

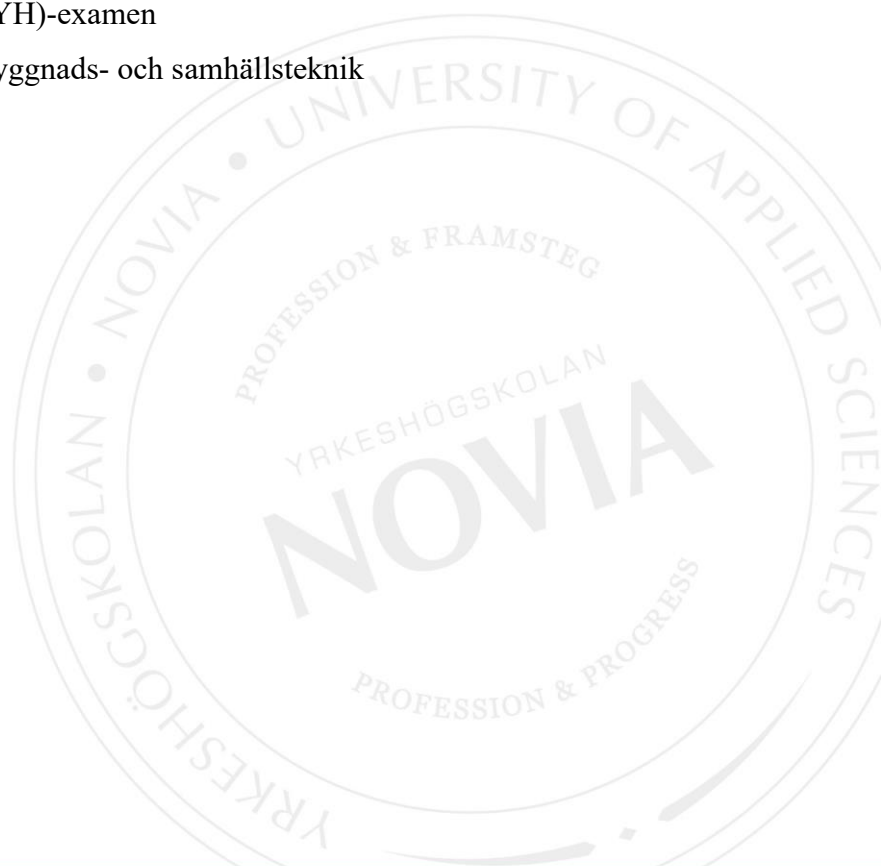
# Handbok för CLT-konstruktion

August Stenberg

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för byggnads- och samhällsteknik

Vasa 2020



## EXAMENSARBETE

Författare:	August Stenberg
Utbildning och ort:	Byggnads- och samhällsteknik, Vasa
Inriktningsalternativ:	Konstruktionsplanering
Handledare:	Anders Borg

Titel: Handbok för CLT-konstruktion

---

Datum: 17.5.2020

Sidantal: 10

Bilagor: 1

---

### Abstrakt

Syftet med detta examensarbete har varit att producera en handbok för planering av CLT-konstruktioner. Målsättningen är att byggnadskonstruktören kan använda arbetet som hjälp för att komma igång med planeringen och snabba upp processen. Eftersom CLT är ett relativt nytt byggnadsmaterial i Finland, saknar de flesta konstruktörer erfarenhet i konstruktionsplanering med materialet. Handboken skall fungera som en samling med väsentlig information och principer för konstruktionsplaneringen. Utgående från inhämtad kunskap och handbokens anvisningar är tanken att i framtiden göra upp automatiserade beräkningsbotten för dimensioneringen av CLT-konstruktioner för att ytterligare påskynda konstruktionsplaneringen.

I detta examensarbete har jag sökt svar på hur konstruktionsplaneringen av CLT avviker från planeringen av övriga träkonstruktioner. Jag har även undersökt materialets för- och nackdelar. Arbetet är uppbyggt kring en kort beskrivande del som innehåller bakgrunden för examensarbetet, inledningen och teorierna för CLT samt en beskrivning av resultat och en sammanfattning.

Resultatet av examensarbetet presenteras i bilaga 1 som innehåller handboken för CLT-konstruktioner. Handboken innehåller en introduktion till materialet, byggnadsfysikaliska egenskaper, dimensioneringsanvisningar samt exempel på och anvisningar för konstruktionslösningar. Handboken har två bilagor som innehåller beräkningsexempel för bjälklagsvibration och böjstyvheten för en CLT-skiva 7-lamellskikt.

---

Språk: svenska

Nyckelord: CLT, EN 1995, dimensionering, byggnadsfysik

---

# OPINNÄYTETYÖ

Tekijä:	August Stenberg
Koulutus ja paikkakunta:	Rakennus- ja yhteiskuntatekniikka, Vaasa
Suuntautumisvaihtoehto:	Rakennesuunnittelu
Ohjaaja:	Anders Borg

Nimike: CLT-rakenteiden suunnittelukäsikirja

---

Päivämäärä: 17.5.2020

Sivumäärä: 10

Liitteet: 1

---

## Tiivistelmä

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa käsikirja CLT-rakenteiden suunnitteluun. Tavoitteena oli, että rakennesuunnittelija voi käyttää työtä apuna suunnittelun vaikeaan aloittamisvaiheeseen ja suunnitteluprosessin nopeuttamiseen. CLT on Suomessa suhteellisen uusi rakennusmateriaali, eikä käytännön kokemusta löydy kovinkaan paljon. Käsikirjan päämääränä on toimia kokoelmana keskeiselle tiedolle ja periaatteille CLT-rakenteiden suunnittelussa. Saatujen tietojen ja käsikirjan ohjeistusten perusteella on tulevaisuudessa tarkoitus luoda automatisoidut laskentapohjat CLT-rakenteille.

Työssä on etsitty vastauksia siihen, miten CLT-rakenteiden suunnittelu eroaa muiden puurakenteiden suunnittelusta sekä mitä etuja ja haittoja materiaalin käyttöön liittyy. Työ on rakennettu lyhyellä kuvailevalla osalla, joka sisältää opinnäytetyön taustan, johdannon ja teorian CLT-levyille sekä tulosten kuvauksen ja yhteenvedon.

Opinnäytetyön tulos on esitetty liitteessä 1, joka sisältää CLT-rakenteiden suunnittelukäsikirjan. Käsikirja sisältää ominaistietoja CLT-levyistä, ohjeita rakenteen mitoittamiseen ja rakennefysikaaliseen suunnitteluun sekä ohjeita rakenteellisten yksityiskohtien ja liitosdetaljien suunnitteluun. Käsikirjassa on kaksi liitettä, jotka sisältävät laskentaesimerkkejä välipohjarakenteen värähtelymitoitukseen sekä 7-lamellikerroksisen CLT-levyn taivutusjäykkyyden laskentaan.

---

Kieli: ruotsi

Avainsanat: CLT, EN 1995, mitoitus, rakennusfysiikka

---

## BACHELOR'S THESIS

Author: August Stenberg  
Degree Programme: Construction and Civil Engineering, Vasa  
Specialization: Structural Engineering  
Supervisors: Anders Borg

Title: Handbook for CLT structures

---

Date: May 17, 2020

Number of pages: 10

Appendices: 1

---

### Abstract

The purpose of this thesis was to produce a handbook for a design of CLT structures. The goal is to enable the structural engineer to use the work as help to get started with designing and to speed up the process. Since CLT is a relatively new building material in Finland, most designers lack experience in designing with the material. The manual should serve as a collection of essential information and principles for design of CLT structures. Based on the knowledge gained and the handbook, the idea is to produce automated calculation models for the design of CLT structures in the future, to further accelerate the structural designing process.

This thesis has sought answers to how structural design of CLT differs from designing of other wood structures and investigated the advantages and disadvantages of the material. The thesis is structured with a short descriptive section that contains the background for the thesis, an introduction and the theory for CLT, as well as a description of the results and a summary.

The results of the thesis are presented in Appendix 1, which contains the manual for CLT structures. The handbook contains an introduction to the material, building physical properties, instructions for structural design as well as examples of and instructions for structural solutions. The handbook has two appendices that contain calculation examples for vibration performance of CLT-floor layer structures and the bending stiffness of a 7-layer CLT panels.

---

Language: Swedish

Key words: CLT, EN 1995, structural design, building physics

---

# Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Beställare .....	1
1.2	Problemformulering.....	1
1.3	Metoder.....	2
1.4	Avgränsning.....	2
2	CLT som byggnadsmaterial .....	2
2.1	Allmänt om CLT.....	2
2.2	Tillverkning .....	3
2.3	Konstruktionsplanering med CLT .....	4
2.4	Dimensionering.....	5
2.5	Byggnadsfysikaliska egenskaper .....	5
2.6	Branddimensionering.....	6
3	Resultat .....	7
4	Slutsatser.....	8
	Källförteckning.....	10

## Bilagor

Bilaga 1: Suunnittelukäsikirja CLT-rakenteille

# **1 Inledning**

Syftet för mitt examensarbete var att producera en handbok för planering av CLT-konstruktioner. Handboken skall fungera som en samling med väsentlig information och principer för konstruktionsplaneringen. Målsättningen är att byggnadskonstruktören kan använda arbetet som hjälp för att komma igång med planeringen och snabba upp processen. Utgående från inhämtad kunskap och handbokens anvisningar är tanken att i framtiden göra upp beräkningsbotten för CLT-konstruktioner för att ytterligare påskynda konstruktionsplaneringen.

Arbetet är uppbyggt med en kort beskrivande del som innehåller bakgrund för examensarbetet, en kort inledning och teori för CLT samt beskrivning av resultat och sammanfattning. Resultatet av examensarbetet är presenterat i bilaga 1, som innehåller handboken för CLT-konstruktioner.

## **1.1 Beställare**

Uppdragsgivaren för examensarbetet är företaget Ideastructura Oy som är en ingenjörbyrå för byggnadsplanering. Företaget har kontor i Helsingfors, Tavastehus samt Karleby och har verksamhet i södra och mellersta delarna av landet. Ideastructura är ett mångsidigt företag med stor variation i utbudet av tjänster. I huvudsakligen består tjänsterna av mångsidig konstruktions- och byggnadsfysikalisk planering samt konditions- och inomhusluftsundersökningar. (Ideastructura Oy, 2020)

## **1.2 Problemformulering**

Eftersom CLT är ett relativt nytt byggnadsmaterial i Finland saknar de flesta konstruktörer erfarenhet i konstruktionsplaneringen av materialet. På grund av att materialet är nytt finns det även brister i dimensionerings principer och program. I detta examensarbete har jag sökt svar på hur konstruktionsplaneringen av CLT avviker från planeringen av övriga träkonstruktioner. Jag har även undersökt för- och nackdelar med materialet.

### 1.3 Metoder

I undersökningen har jag forskat i många olika källor. Jag har bekantat mig med både inhemska tillverkares hemsidor samt andra inhemska och utländska källor. Eftersom en del av källorna är tillverkares egna material har det varit viktigt att vara källkritisk och bekräfta informationen från flera källor. Examensarbetet innehåller väsentliga dimensioneringsanvisningar för CLT-konstruktioner. Anvisningarna är en sammanfattning av normernas och CLT-tillverkarnas dimensioneringsanvisningar, samt utländska anvisningar.

### 1.4 Avgränsning

Arbetet avgränsas till flervåningshus med CLT-konstruktioner. Beställaren har framfört synpunkter för både avgränsning och innehåll. Eftersom syftet för arbetet är att fungera som en grund i konstruktionsplaneringen av CLT, är innehållet grundläggande. Beställaren Ideastructura har gett synpunkter på vilka delar av handbokens innehåll som är de mest väsentliga samt de mest användbara i det praktiska arbetet. Dessa synpunkter har beaktats i arbetet och dessa delar innehåller mera fördjupad information.

## 2 CLT som byggnadsmaterial

Detta kapitel innehåller allmän information om CLT, principer för elementritningar, tillverkningsprocessen samt ytbehandlings- och bearbetningsmöjligheter för CLT-skivan. Avsikten för detta kapitel är att ge en helhetsbild över vad CLT är och sammanfatta väsentlig information som behövs för planeringen av CLT-konstruktioner.

### 2.1 Allmänt om CLT

Korslimmade massivträskivor kallas i Finland för CLT som står för *Cross Laminated Timber* eller på finska för *ristiinliimattu monikerroslevy*. Benämningen av CLT varierar mellan olika länder och kallas också för bland annat KL-trä, KLH, BSP och X-Lam. CLT är massivträskivor med flera skikt av trälameller, där lamellskikten limmas korsvis i förhållande till varandra. CLT kan användas som bärande och icke-bärande konstruktion i ytterväggar, bjälklag och mellanväggar. På grund av CLT-skivans höga bärförmåga kan den användas till stora höghusbyggnader och konstruktionerna blir inte onödigt massiva med tanke på utrymmesanvändningen. CLT-elementbyggandet motsvarar byggande med

betongelement, där fördelen med CLT är att konstruktionerna är lättare och därmed ett smidigare byggnadsmaterial att arbeta med. (Puuinfo Oy, 2020)

CLT har sitt ursprung i Österrike där den utvecklades början av 1990-talet. Materialet har använts i till exempel Schweiz, Tyskland och Nordamerika en längre tid. Tidigare har CLT importerats från Mellaneuropa, men inom de senaste åren har man också börjat tillverka CLT i Finland. Oy Crosslam Kuhmo Ltd började tillverkningen som det första företaget i Finland år 2014. CLT kan användas tillsammans med betong- och stålkonstruktioner vilket ger mycket möjligheter för arkitektplaneringen. CLT är ett återvinningsbart byggnadsmaterial som inte orsakar problemavfall och binder i sig koldioxid. (FPinnovations, 2019; Oy Crosslam Kuhmo Ltd)

CLT fungerar i konstruktionen som ångspärr och med placering i varma skiktet av konstruktionen blir risken för fuktskador väldigt liten. Inomhusluften får en god kvalitet i och med att CLT jämnar ut luftfuktigheten och därmed håller konstruktionen frisk. Tack vare goda byggnadsfysikaliska egenskaper åstadkoms en säker byggnad, där risken för konstruktionsskador är liten och byggnaden hålls frisk under dess livslängd. På grund av att CLT har mindre massa än till exempel betongkonstruktioner är inte ljudisoleringsförmågan lika bra, men däremot är akustikegenskaperna goda. När det gäller träkonstruktioner uppstår det ofta problem med brandsäkerhet. Då skivans yttersta lameller branddimensioneras för att hålla under brandskyddstiden skyddar de inre lamellerna under brand och konstruktionen behåller sin bärförmåga. (FPinnovations, 2019; A-insinööri, 2017)

## **2.2 Tillverkning**

CLT-skivor är oftast gjorda av 3, 5 eller 7 skikt, men kan också ha flera skikt. Skivorna kan vara 60 - 400 mm tjocka, 2,95 - 4,8 m breda och 12 - 20 m långa beroende på tillverkare. En grundprincip för CLT-skivor är att det finns två olika modeller: L-skiva (length) och C-skiva (cross). Lamellerna på L-skivornas yttersta skikt går i dess längre riktning och i C-skivorna dess kortare riktning. CLT-skivorna är oftast gjorda av gran eller tall. De yttersta skikten kan också vara av annat träslag beroende på hurdan yta man strävar efter. CLT-skivan kan vara limmad på två olika sätt, som påverkar skivans egenskaper. Man kan limma skivorna så att både bräderna i skikten och de korsande lamellskikten limmas ihop, eller så att bara de korsande skikten limmas men bräderna är olimmade i förhållande varandra. Genom att



limma både bräderna och skikten ihop blir skivan tätare men detta kan orsaka sprickor i skivan då den torkar. (Puuinfo Oy, 2020; Oy Crosslam Kuhmo Ltd)

CLT-konstruktioner består vanligtvis av element som tillverkas vid fabrik. Genom att göra en noggrann elementplanering redan under arkitektplaneringen, där tillverkningsstorlekar och bearbetningsmöjligheter tas i beaktande, undviks onödigt spill som redan i tillverkningsskedet är mycket onyttigt både ekonomiskt och ekologiskt. Efter att CLT-skivan har limmats ihop, kan man bearbeta elementen med en CNC-maskin. Med CNC-maskinen kan skivan sågas till rätt storlek. CNC-maskiner innehåller normalt cirkelsåg, tapp- och skivfräs. Med CNC-maskinen kan former, nödvändiga hål och fasningar för husteknik göras under tillverkningen. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd)

### **2.3 Konstruktionsplanering med CLT**

CLT är ett behändigt byggnadsmaterial på grund av dess breda möjligheter till konstruktionslösningar. Trä är som byggnadsmaterial relativt styvt och starkt i förhållande till dess vikt. CLT kan användas i både väggar och bjälklag som både bärande och förstyvande stomme samt som icke-bärande konstruktioner som består endast av CLT. Materialet kan också användas tillsammans med andra byggnadsmaterial som stål, betong och i andra slag av träkonstruktioner. Detta ger mycket möjligheter för konstruktionslösningar och arkitektoniska lösningar. (FPinnovations, 2019)

Valet för typen av CLT-skiva görs alltid beroende på byggnadsprojekt, där valet baserar sig på dimensionering, belastning, användningsändamål och byggnadsbestämmelsernas krav. Elementkonstruktioner med CLT är mycket fördelaktiga då elementen kan tillverkas i stora längder utan fogar. Arkitekten skall redan i tidigt skede göra elementuppdeleningen på basen av möjliga tillverkningsstorlekar för att minimera på produktionens spill. CLT-element kan också tillverkas som utrymmeselement, där elementen görs som en hel byggnadsdel. Under fabrikstillverkningen kan t.ex. husteknik, fönster, dörrar och fast inredning installeras redan vid fabriken, vilket underlättar byggnadsprocessen. (FPinnovations, 2019; Stora Enso , 2014)

## 2.4 Dimensionering

Dimensioneringen med CLT-konstruktioner görs enligt eurokodnormer för grunder i konstruktionsplanering och belastning EN 1990 och EN 1991 samt eurokoden 5 för planering av träkonstruktioner EN 1995-1-1 och EN 1995-1-2 samt den nationella bilagan NA(FI). CLT-handböcker och CLT-tillverkares dimensioneringsanvisningar innehåller oftast egna hållfasthetstabeller som kan tillämpas i dimensionering i samband med normer och byggnadsbestämmelser. Dimensioneringen av CLT-konstruktioner kan göras med dimensioneringsprogram, som t.ex. FEM-beräkningsprogram för bjälklagskonstruktioner. Eftersom CLT är ett relativt nytt byggnadsmaterial finns det utrymme för utveckling i både dimensioneringsprogram, -metoder och -anvisningar enligt finländska normer och bestämmelser. (Pontti Puutuotekeskus, 2012)

Den mest centrala skillnaden från mera normala träkonstruktioners dimensionering är det effektiva tvärsnittets betydelse för CLT-skivans bärförmåga. Då man dimensionerar CLT-konstruktioner bör man endast beakta lamellskikten i samma riktning med spänningarna som orsakas av belastning. Utav beräkningen av det effektiva tvärsnittet fås bl.a. effektivt tröghetsmoment, samt effektiv böjstyvhet och böjmotstånd, som bör bestämmas för hållfasthetsberäkningar. (Kevarinmäki, 2017a)

Finland har de strängaste kraven för dimensionering av bjälklagsvibration. Grunden i dimensioneringen är att konstruktionens egenfrekvens och nedböjning, som påverkas av storleken och spännvidden för bjälklagskonstruktionen, skall uppfylla normernas krav. Det mest effektiva sättet att åstadkomma en egenfrekvens och nedböjning enligt finländska krav är att göra bjälklagskonstruktionen med en tjock bjälklagsskiva så att dess massa blir högre. Detta gör att bjälklagskonstruktionerna ofta blir onödigt massiva och kostnaderna för enbart bjälklaget blir onödigt höga. (Lahtela, 2014)

## 2.5 Byggnadsfysikaliska egenskaper

CLT fungerar som ångspärr i konstruktioner. Ångspärrsförmågan uppstår av samverkan av trälamellerna och limmet. CLT-skivan hindrar dock inte diffusion i konstruktionen fullständigt vilket gör att konstruktionen hålls frisk. Genom att CLT-skivan sköter om konstruktionens behov för ångspärr, kan man minska på risken för misstag i monteringen vilket gör byggnaden fukttekniskt säkrare. Trä jämnar ut inomhusluftens fuktmängd genom

en sakta diffusion, som leder till en god kvalitet i inomhusluften. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2019)

Då man använder CLT som bärande konstruktion förbättras konstruktionens isoleringsförmåga. Den egentliga isoleringens konvektion minskar och det uppstår inte lika stora temperaturskillnader och därmed luftströmningar i isoleringen. Eftersom CLT kan tillverkas som stora element kan exempelvis ytterväggar göras med färre fogar som minskar risken för köldbryggor. U-värdet på CLT-skivan varierar beroende på lamellernas tjocklek och mängden skikt. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2019; Stora Enso, 2015)

Ljudisoleringsförmågan hos konstruktioner påverkas direkt av konstruktionens massa. Eftersom CLT är ett så lätt material, är inte ljudisoleringsförmågan optimal och akustikplaneringen bör göras noggrant. Genom omfattande ljudisolering kan man uppnå en CLT-konstruktion med relativt goda akustikegenskaper. (A-insinööri, 2017)

## **2.6 Branddimensionering**

Branddimensioneringen görs enligt Miljöministeriets förordning för brandsäkerhet 848/2017 som tagits i bruk 1.1.2018. Branddimensionering kan göras på två olika sätt genom tabelldimensionering eller funktionell dimensionering. Enligt bestämmelsernas krav för brandsäkerhet kan tabelldimensionering användas för de flesta byggnadsprojekt i Finland. På basen av tabellernas krav kan man välja brandklass för byggnaden och därmed välja lämpliga byggnadsmaterial enligt den. Funktionell branddimensionering används i mera speciella projekt där man inte kan använda tabelldimensionering, eller där man vill optimera konstruktionen på grund av märkvärdiga kostnadsbesparingar. Funktionell dimensionering baserar sig på att man tar i beaktande byggnadens användningsändamål, egenskaper och möjliga uppkommande risksituationer. (Puuinfo Oy - Paloturvallinen puutalo, 2018, ss. 14-15)

Vid brand förkolnar yttersta skikten av CLT-skivan men de inre skikten är skyddade vilket gör att CLT inte förlorar sin bärförmåga. Det yttersta skiktet skall vara dimensionerat för att hålla hela brandexponeringstiden. Då förkolningen når limskiktet, antas det yttersta lamellskiktet falla bort och förkolningshastigheten ökar. Det effektivaste sättet för att nå tillräcklig brandsäkerhet är att skydda konstruktionen med en brandskyddsskiva. Det går också att behandla CLT med brandskyddsfärg som hindrar träet för att flamma upp. För

branddimensionering av CLT finns anvisningar i Puuinfos Paloturvallinen puutalo som grundar sig på miljöministeriets förordning för brandsäkerhetsbestämmelser. I Puuinfos konstruktionstypssamlingar finns vanliga konstruktionslösningar enligt brandklasser som kan utnyttjas i planeringen av CLT-konstruktioner. (Puuinfo Oy - Paloturvallinen puutalo, 2018, s. 92)

### **3 Resultat**

Resultatet av arbetet presenteras i bilaga 1 som innehåller en handbok för konstruktionsplanering med CLT. Handboken innehåller information om CLT, principer och anvisningar för dimensionering av väsentliga CLT-konstruktioner, CLT-skivors byggnadsfysikaliska egenskaper och exempel på detaljlösningar och konstruktionstyper samt beräkningsexempel.

Kapitel 2 av handboken består av en allmän information om CLT, tillverkningen och elementkonstruktioners planering med anvisningar för elementritningar. Innehållet fungerar som en introduktion till konstruktionsplanering med CLT och skall ge en grundläggande bild av vad CLT är, dess materialegenskaper och hur CLT kan tillämpas i byggnadens konstruktion.

Kapitlet för byggnadsfysikaliska egenskaper för CLT är indelat i fukttekniska egenskaper, akustikegenskaper och ljudisolering, värmeisoleringsförmåga och lufttäthet samt branddimensionering. I kapitlet framkommer CLT-skivans fukttekniska beteende och egenskaper som avviker från typiska träkonstruktioner samt vad som bör beaktas för CLT-konstruktioner. Det finns beräkningsanvisningar för CLT-skivans karakteristiska värmeisoleringsförmåga och hur CLT-skivan påverkar hela konstruktionens värmeisoleringsförmåga. I kapitlet beskrivs hur CLT påverkar konstruktionens välmående och energieffektivitet, samt vad som bör beaktas med tanke på lufttäthet. Kapitlet innehåller en kort genomgång av akustikegenskaperna hos CLT där ljudisoleringsförmågan är en svaghet och bör beaktas i konstruktionsplaneringen.

CLT-konstruktionens brandsäkerhet är en central del av konstruktionsplaneringen. I kapitlet framkommer vad som bör beaktas i trähöghus och i en del dimensioneringsprinciper för CLT-konstruktioner. Handboken innehåller inte branddimensioneringsanvisningar p.g.a. att

allmänna anvisningar för CLT-konstruktioners branddimensionering saknas och dimensioneringen baseras på tillverkarnas anvisningar och kan därmed variera.

En av de mest väsentliga delarna av konstruktionsplaneringen med CLT är dimensioneringen av konstruktionerna. Kapitlet gällande konstruktionsplanering innehåller omfattande dimensioneringsanvisningar för CLT-konstruktioner. Det finns dimensioneringsanvisningar för lod- och vågrätt belastade väggkonstruktioner, bjälklagskonstruktioner, förstövning av byggnaden och anslutningar. En av de mest problematiska dimensioneringarna för träkonstruktioner är bjälklagens dimensionering för vibration.

Förutom dimensioneringsanvisningar finns det också ett beräkningsexempel för bjälklagets vibration, där det framgår vad som påverkar i vibrationsdimensioneringen. Det finns också ett beräkningsexempel på hur man bestämmer det effektiva tvärsnittets effektivitetskoefficient för CLT-skivor med fler än 5 lamellskikt. I beräkningsexemplen framkommer vilka faktorer som inverkar i resultatet och egenskaper för både vibrationsdimensioneringen av bjälklag samt beräkningen av böjstyvheten för en CLT-skiva med 7-lamellskikt.

Kapitlet för anslutningsdetaljer innehåller detaljer för de mest centrala konstruktionslösningarna för CLT. Detaljerna innehåller anvisningar för vad som bör beaktas i anslutningar och övriga konstruktioner och bilder som stöd till anvisningarna. Målsättningen för anslutningsdetaljerna är att ge en bild över hur konstruktionen skall se ut och därmed underlätta konstruktionsplaneringen.

## **4 Slutsatser**

Under arbetet har det blivit klart att CLT på många sätt är ett mycket användbart byggnadsmaterial med goda egenskaper. Med hjälp av materialets byggnadsfysikaliska egenskaper samt omfattande och noggrann konstruktionsplanering, kan man konstruera säkra och ekologiska byggnader. Eftersom CLT är lätt att utforma och element kan göras till en hög förtillverkningsgrad blir produktionsprocessen snabb och smidig. Hållfastheten, styvheten och kombinationsegenskapen med andra byggnadsmaterial ger många möjligheter för olika konstruktionslösningar.

Svagheter för materialet är bland annat ljudisoleringsförmågan och brandsäkerheten. Ljudisoleringen för CLT-konstruktioner bör göras omfattande för att förhindra höga nivåer av störande ljud. På grund av bestämmelser för brandsäkerhet hamnar man ofta och klä in träkonstruktionen i större byggnader. Därför kan man inte utnyttja CLT-skivans estetik som enligt min åsikt är en stor nackdel.

Eftersom en stor del av källmaterialet och informationen består av tillverkarnas eget material, är informationen kanske inte fullständigt objektivt. Tillverkarna vill sälja en produkt som inte har negativa egenskaper. Därför har det varit viktigt att bekräfta informationen från flera källor för att nå opartiska slutsatser.

Eftersom CLT är ett så nytt byggnadsmaterial inom byggnadsbranschen i Finland finns det rum för utveckling. Allmänna anvisningar för branddimensionering av CLT-konstruktioner skulle behövas för att tillverkarnas anvisningar ofta inte är tillräckligt omfattande. Allmänna dimensioneringsanvisningar och -program är bristfälliga för CLT-konstruktioner. Bjälklagsplattornas vibrationsdimensionering är bristfällig och borde undersökas utförligare.

## Källförteckning

- A-insinöörit. (2017). Puurakennusten akustiikkasuunnittelu. *Puuinfo: Vaativien puurakenteiden koulutus 2017* (ss. 1 - 121). Puuinfo.
- FPinnovations. (2019). Canadian CLT Handbook 2019 Edition. Pointe-Claire, Quebec, Kanada.
- Ideastructura Oy, (2020). *Ideasructura*. [Online]  
<https://www.ideastructura.com/>  
 [Hämtad 8.5.2020]
- Kevarinmäki, A. (2017a). *RIL 205-1-2017 CLT lisäohjeet: Crosslam Kuhmo CLT*. [Online]  
<https://docplayer.fi/70811987-Ril-lisaohjeet-crosslam-kuhmo-clt.html>  
 [Hämtad 12.4.2020]
- Lahtela, T. (2014). Lattiat-Värähtelymitoitus. *TuplaA-koulutus 2014*. Puuinfo Oy.
- Oy Crosslam Kuhmo Ltd. (2019). *Crosslam*. [Online]  
<https://www.crosslam.fi/tuotteet/tekniset-tiedot.html>  
 [Hämtad 4.4.2020]
- Oy Crosslam Kuhmo Ltd. *CLT-suunnittelun ohje*.  
<https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/clt-suunnittelun-ohje.pdf>  
 [Hämtad 6.4.2020]
- Pontti Puutuotekeskus. (12.2.2012). CLT-rakenteet suunnittelun näkökulmasta. Pontti Puutuotekeskus.
- Puuinfo Oy - Paloturvallinen puutalo. (2018). *Paloturvallinen puutalo - Asuin- ja toimitilarakentaminen (Palokirja)*.  
<https://www.puuinfo.fi/paloturvallinen-puutalo-asuin-ja-toimitilarakentaminen>  
 [Hämtad 24.4.2020]
- Puuinfo Oy. (2020). *Insinööripuutuotteet*. Monikerroslevy (CLT) [Online]  
<https://www.puuinfo.fi/puutieto/insinooripuutuotteet/monikerroslevy>  
 [Hämtad 1.5.2020]
- Stora Enso . (2014). *Stora Enso CLT*.  
<https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/CLT%20image%20brochure%20FI.pdf>  
 [Hämtad 27.4.2020]
- Stora Enso. (2015). *Stora Enso Wood Products - Building Solutions*. Technical folder CLT - EN:  
<http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Technical-folder-CLT-EN.pdf>  
 [Hämtad 14.4.2020]

BILAGA 1

# Suunnittelukäsikirja CLT-rakenteille



# Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	1
1.1	Rajaus.....	1
2	Materiaaliominaisuudet .....	1
2.1	Yleisesti CLT:stä .....	1
2.2	CLT-levy ja valmistus .....	2
2.3	Elementtipiirustukset .....	4
3	Rakennusfysiikka .....	5
3.1	Kosteus ja vesihöyryläpäisevyys .....	5
3.2	Lämmöneristys ja ilmatiiveys .....	6
3.3	Akustiikka ja ääneneristävyys .....	7
3.4	Palomitoitus .....	8
4	Suunnitteluohje.....	11
4.1	Yleistä suunnittelusta ja mitoituksesta.....	11
4.2	CLT-levytyypin valinta ja elementtimitoitus.....	12
4.3	CLT-rakenteen lujuuslaskenta .....	13
4.3.1	Teholliset poikkileikkausvakiot.....	14
4.4	Seinäelementin kestävyys .....	19
4.4.1	Seinän nurjahduskestävyys.....	20
4.4.2	Aukkopalkin kestävyys .....	21
4.4.3	Leikkauskestävyys seinälevyn liimasaumassa .....	25
4.4.4	Tuulikuorman aiheuttama taipuma .....	25
4.4.5	Seinän tukipainekestävyys.....	26
4.4.6	Jäykistävän seinän kestävyys .....	27
4.5	Rakennuksen jäykistys.....	29
4.6	Liitosten mitoitusperiaatteet .....	30
4.6.1	Ruuviliitokset .....	31

4.6.2	Kulmalevyliitokset .....	35
4.7	Välipohjanlevyn mitoitus.....	37
4.7.1	Välipohjan taivutuskestävyys .....	38
4.7.2	Leikkauskestävyys neutraaliakselilla sekä liimasaumassa .....	38
4.7.3	Välipohjan taipuma .....	39
4.7.4	Välipohjan tukipainekestävyys.....	40
4.7.5	Välipohjan värähtely.....	42
5	Rakenteelliset yksityiskohdat ja liitokset .....	45
5.1	Sokkeliliitokset .....	46
5.2	Seinäliitokset.....	47
5.3	Välipohja- seinäliitokset .....	49
5.4	Vesikatto-seinäliitos.....	50
5.5	CLT-seinälevyn palkkiliitos .....	52
	Lähdeluettelo .....	54

## Liitteet

Liite 1: CLT-välipohjan värähtelymitoituksen laskentaesimerkki

Liite 2: 7-lamellikerroksisen CLT-levyn tehollisen poikkileikkauksen laskentaesimerkki

# 1 Johdanto

CLT on Suomessa suhteellisen uusi rakennusmateriaali ja käytännön kokemusta ei suunnittelualalla ole kovinkaan paljon. Tämän käsikirjan tavoitteena on toimia ohjeistuksena CLT-rakenteiden suunnittelussa. Käsikirja sisältää ominaistietoja CLT-levyistä, ohjeita rakenteen mitoittamiseen, rakennefysikaaliseen suunnitteluun sekä ohjeita rakenteellisten yksityiskohtien ja liitosdetaljen suunnitteluun. Tarkoituksena on, että rakennesuunnittelija pääsee käsikirjan avulla suunnittelun vaikean aloittamisvaiheen yli ja suunnitteluprosessi nopeutuu.

## 1.1 Rajaus

Käsikirjan sisältö on rajattu CLT-rakenteisen puukerrostalon suunnitteluun. Tässä työssä sisältöä on pääsääntöisesti rajattu CLT-rakenteiden ja tavanomaisten puurakenteiden eroavaisuuksiin rakennesuunnittelun näkökulmasta. Työn tavoitteesta johtuen käsikirjaan on sisällytetty pääosin perustavaa tietoa CLT-rakenteiden suunnittelusta, mutta rakennesuunnittelijan näkökulmasta keskeisimpiin osa-alueisiin on keskitytty perusteellisemmin.

# 2 Materiaaliominaisuudet

Tämä kappale toimii käsikirjan perehdyttävänä osana, jossa käydään läpi yleistä tietoa CLT-levyistä. Kappale sisältää ominaistietoa CLT-levyistä, periaatteita elementtipiirtämiseen, tietoa valmistuksesta sekä pintakäsittely-, työstö- ja muotoilumahdollisuuksista. Kappaleen tavoitteena on antaa yleistä kuvaa rakennesuunnittelijalle siitä, mikä CLT on sekä rakennesuunnitteluun vaadittavaa perustietoa.

## 2.1 Yleisesti CLT:stä

CLT (Cross Laminated Timber) ovat massiivipuuelementtejä, joissa puulamelleja liimataan kerroksittain ristiin, mikä luo puuelementtiin suuren kuormituskapasiteetin ja jäykkyyden. Tämän ansiosta CLT-levyt sopeutuvat hyvin kaikkiin kantaviin ja ei-kantaviin rakenteisiin. CLT toimii puukerrostalossa kantavanrakenteen lisäksi jäykistävänä rakenteena, joten erillistä levyjäykistystä ei tarvita. Lujuus- ja jäykkyysominaisuuksien ansiosta seinien

rakenneratkaisut eivät ole kovinkaan massiivisia, joten rakennuksen tilankäyttö on tehokasta. CLT-levyjä käytetään seinä, väliseinä, välipohja ja kattorakenteissa. CLT-rakenneratkaisujen monipuolisuus antaa laajat mahdollisuudet erityyppisille rakenteellisille ja arkkitehtuurisille ratkaisuille. (Puuinfo Oy, 2020)

Rakennusfysikaaliset ominaisuudet tekevät CLT-rakenteesta turvallisen koko rakennuksen elinkaaren ajaksi. CLT-levy toimii höyrynsulkuna rakenteessa ja CLT-levyn ollessa rakenteen lämpimässä osassa ovat kosteusvaurioiden riskit ovat lähes olemattomat. CLT-rakenne antaa sisäilmalle hyvän laadun sillä puu tasaa sisäilman kosteutta varastoimalla sitä itseensä ja ilman kuivuesssa päästää kosteuden takaisin ilmaan. (FPInnovations, 2019; Pontti Puutuotekeskus, 2012)

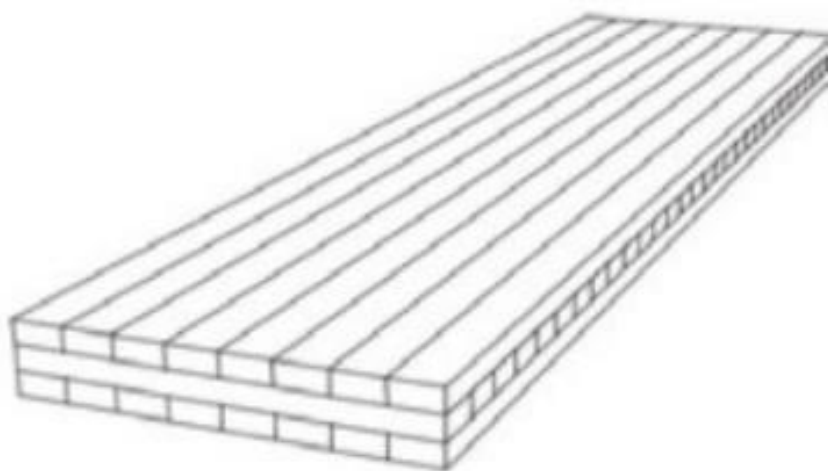
CLT-rakennukset ovat ympäristöystävällisiä puun toimiessa hiilivarastona ja sitoen hiilidioksidia. CLT on kierrätettävä materiaali, josta ei synny ongelmajätettä. CLT on kehitetty Itävallassa 1990-luvulla ja se on ollut käytössä ulkomailla kuten Saksassa, Sveitsissä ja Pohjois-Amerikassa jo jonkin aikaa mutta Suomessa se on suhteellisen uusi rakennusmateriaali. Suomessa ensimmäinen CLT-valmistaja on Oy Crosslam Kuhmo Ltd, joka aloitti CLT-elementtien valmistuksen vuonna 2014. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd; FPInnovations, 2019)

## **2.2 CLT-levy ja valmistus**

CLT-levyjen puulajikkeena käytetään pääasiassa mäntyä tai kuusta. Ristiliimaus tehdään joko syrjäliimattuna, jolloin lamellikerrosten laudat liimataan syrjistäan toisiinsa ja sitten kerroksittain ristiin. Ristiliimaus voidaan myös tehdä syrjäliimaamattomana, jolloin lautakerrokset ovat toisiinsa nähden irrallaan ja ainoastaan kerrosten välit liimataan. CLT-levyjä valmistetaan C-levymallina (Cross) tai L-levymallina (Length) kuvien 1 ja 2 mukaisesti. L-levyissä pintalamellit ovat CLT-levyn pituussuuntaan ja soveltuvat vaakarakenteisiin kuten välipohjiin. C-levyissä pintalamellit ovat leveyssuuntaan ja soveltuvat pystyrakenteisiin kuten seinärakenteeksi. Valmistustekniikka ja levyjen ominaisuudet ja mitat vaihtelevat riippuen valmistajasta. CLT-levyjä valmistetaan 2,95–4,8m maksimileveyksillä ja pituudet voivat olla 12–20m ja levyn paksuus voi olla 60–400mm. (Puuinfo Oy, 2020; Oy Crosslam Kuhmo Ltd)



*Kuva 1: C-Levytyyppi (Oy Crosslam Kuhmo Ltd)*



*Kuva 2: L-Levytyyppi (Oy Crosslam Kuhmo Ltd)*

CLT-levy voi rakenteessa olla näkyvä, jolloin levyn näkyvä pinta hiotaan karkeasti valmistusvaiheessa. CLT-rakenteessa kaikki näkyvät pinnat hiotaan kuitenkin työmaalla ennen pintakäsittelyä. Mikäli halutaan paneelimainen pinta, voidaan pintalamellit valmistuksessa urittaa höyläämällä lamelleihin viiste. CLT-levyt ovat pääosin valmistettu männystä tai kuusesta, mutta levyyn on myös mahdollista tehdä koivupinta lisäämällä ohut koivulamellikerros vakiolevyn päälle. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd)

CLT-elementtirakentamisessa suuri etu on työstömahdollisuuksien monipuolisuus. CLT-levyn työstöön käytetään CNC-konetta, joka tavanomaisesti sisältää sirkkelin sekä tappi- ja kiekkojyrsimen. CLT-levyyn voidaan CNC-koneella tehdä aukkoja, uria, kolotuksia ja kaarevia muotoja mittatarkasti. CLT-levyjen välisten liitosten työstöjä kuten esimerkiksi puolipontti- tai hammastustyöstöt saadaan CNC-koneella tehtyä mittatarkasti, joka

nopeuttaa rakentamista. CLT-levyyn voidaan jyrsimellä tehdä rakennustekniikalle kolotuksia ja läpivientejä tarpeiden mukaan. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd)

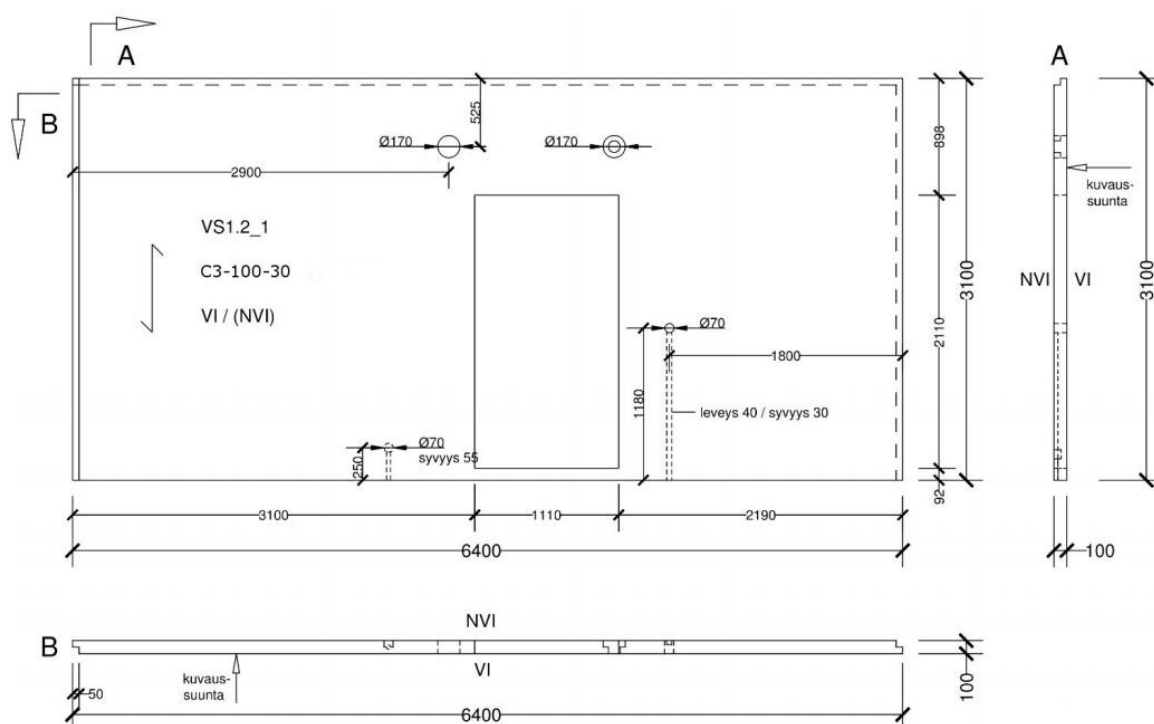
## 2.3 Elementtipiirustukset

CLT- levyjen elementtipiirustukset tulee tehdä valmistajan antamien ohjeistusten mukaan. Piirustusten vaadittu sisältö saattaa vaihdella riippuen valmistajasta. CLT-elementtien piirustusten periaatteet ovat samat kuin betonielementtipiirustuksissa. Tässä kappaleessa on käytetty esimerkkinä Crosslam Kuhmon CLT-elementtipiirustusten ohjeistusta.

Crosslamin elementtikuviin tulee merkitä seuraavat asiat kuvan 3 mukaisesti:

- Elementin kokonaiskuva edestäpäin katsottuna sekä vaaka- ja pystyleikkaukset
- Kuvaus- ja lamellisuunnat merkittynä nuolella
- Elementtitunnus ja rakennetyyppi
- Pintojen laadut, kuvauspuoli ensin mainittuna
- Aukotukset ja viisteet, jotka tulee merkitä selkeästi nuolella ja tekstillä
- Mitat omalla tasolla
- Sähkörasia- ja sähköputkitustyöstöt, sähkörasian vakiokoko on 70mm ja 90mm ja syvyys 55mm

(Oy Crosslam Kuhmo Ltd)



Kuva 3: Crosslam Kuhmo CLT-elementtipiirustus. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd)

### 3 Rakennusfysiikka

Tämä kappale sisältää suunnitteluun tarvittavaa tietoa ja huomioitavaa CLT-levyjen rakennesuunnitteluun rakennusfysiikan näkökulmasta. Kappaleessa käydään läpi CLT-levyjen kosteustekniset ominaisuudet, lämmöneristys-, ilmatiiveys- ja ääniominaisuudet sekä periaatteita palomitoitukseen.

#### 3.1 Kosteus ja vesihöyryläpäisevyys

CLT-rakenne on kosteusteknisesti suotuisa rakennusmateriaali sen kosteusteknisten ominaisuuksien ansiosta. CLT-levyt valmistetaan kuivassa ympäristössä ja riippuen valmistajasta levyjen kosteuspitoisuudet ovat suhteellisen vähäisiä. CLT-elementit toimitetaan tehtaalta työmaalle ja asennus on suhteellisen nopeaa, jolloin rakennuskosteus CLT-rakenteessa on vähäistä. CLT-levyn kosteustekniset ominaisuudet edistävät sisäilmanlaatua, lämmöneristävyyttä ja pidentävät rakenteen elinkaarta. CLT tulee kuitenkin olla suojattu pysyvältä kosteudelta ja esimerkiksi CLT-levyisessä yläpohjarakenteessa voidaan levy suojata vesitiiviillä kermillä. (Stora Enso, 2015)

CLT-levy tasaa sisäilman kosteutta toimien kosteuspuskurina. Sisäilman sisältäessä paljon kosteutta, pystyy CLT-levy absorboimaan kosteutta itseensä, ja ilman kuivuessa päästämään kosteutta takaisin sisäilmaan ja näin antamaan rakennukselle miellyttävän sisäilmanlaadun. CLT-rakenne sallii kosteuden etenemistä rakenteessa diffuusiona ja pitää siten rakenteen hengittävänä ja terveenä eikä levyyn muodostu kuivumisen aiheuttamaa halkeilua. CLT-levyn tiiviiden ristiliimattujen lamellikerrosten ansiosta CLT-levy toimii rakenteessa höyrynsulkuna. Höyrynsulkuominaisuus estää sisäilman lämpimän ja kostean ilman pääsemisen viileämpään eristekerrokseen aiheuttaen kosteusvaurioita eristeeseen kostean ilman viilentyessä ja muodostaessa kondenssikosteutta. CLT-rakenteen liitosten saumat tulee peittää höyrynsulkuteipillä, ettei kosteus pääse epätiiveyksien kautta rakenteen eristykseen. CLT-levy ei ole kosteudelta täysin tiivis, joka mahdollistaa hitaan diffuusion rakenteessa ja pitää rakenteen terveenä. CLT-levyn luoma höyrynsulku tekee rakenteesta kosteusturvallisen koko rakenteen elinkaaren ajan ja pienentää myös riskiä virheisiin höyrynsulun asennuksessa. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2019)

### 3.2 Lämmöneristys ja ilmatiiveys

CLT-rakenne vaikuttaa positiivisesti rakenteen kokonaislämmöneristykseen puun ollessa itsessään eristävä materiaali. Varsinaisen lämmöneristeen toiminta paranee CLT-levyn eristävän ominaisuuden ansiosta, koska lämpötilaerojen aiheuttama konvektio eristeessä vähenee. CLT-levyn lämmöneristys toimii parhaiten levyn ollessa sijoitettu rakenteen kuivaan sisäpintaan. CLT-levyn ollessa erillisessä rakennekerroksessa varsinaisesta eristeestä, kylmäsiltoja ei synny yhtä helposti kuin esimerkiksi tavanomaisessa puurunkorakenteessa, missä puurangat ovat samassa rakennekerroksessa lämmöneristykseen kanssa. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2019)

CLT-levyn ominainen lämmöneristys, U-arvo voidaan laskea kaavasta: (Stora Enso, 2015)

$$U_{CLT} = \frac{1}{R_{si} + \sum \frac{d_i}{\lambda_{CLT}} + R_{se}} \quad [\text{W/m}^2 \text{ K}] \quad (3.1)$$

Jossa:

$R_{si}$	sisäpuolen lämmönvastus	$[\text{m}^2 \text{ K/W}]$
$R_{se}$	ulkopuolen lämmönvastus	$[\text{m}^2 \text{ K/W}]$
$\lambda_{CLT}$	lämmönjohtavuus	$[\text{W/m K}]$
$d_i$	levyn paksuus	$[\text{m}]$

Rakenteen ilmatiiveys vaikuttaa rakennuksen ominaisuuksiin monella eri tapaa. Ilmatiivis rakenne vaikuttaa myönteisesti esimerkiksi sisäilman ilmanpaineeseen, äänieristykseen, sisäilman laatuun ja rakennuksen energiakulutukseen. Rakenteessa olevat ilmavuodot johtavat ilmavirtauksiin rakenteessa ja voivat aiheuttaa kosteusvaurioita, alhaisempaa lämmöneristävyttä ja rakennepinnan epämiellyttäviä lämpötiloja ja kylmiä ilmavirtauksia sisäilmassa. (Stora Enso, 2015)

CLT-levy on itsessään risteävien ja tiiviiden lamellikerrosten ja liimauksen ansiosta suhteellisen ilmatiivis. CLT-rakenteiset seinät voidaan tehdä kokonaisista elementeistä, jolloin saumojen määrä vähenee. Rakenteen vaaka- ja kulmasaumasta tulee tiivistää sauman väliin asennettavalla tiivistenauhalla ilmavirtausten estämiseksi. CLT-levy on tiiveydestä huolimatta hengittävä materiaali, joka parantaa sisäilman laatua. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2019)



### 3.3 Akustiikka ja ääneneristävyys

Rakennushankkeeseen tehdään aina akustiikkasuunnittelu, jossa tulee määrittää rakennukselle vaadittavat työselostukset ja piirustukset. Akustiikkasuunnittelussa huomioidaan äänen kulkureitit, huoneakustiikka, ääneneristys, meluntorjunta sekä värinä- ja runkomelueritys. Ilmaääneneristävyys riippuu massalain mukaan rakenteen pintamassasta  $m$  [ $\text{kg/m}^2$ ] ja ominaistaajuudesta  $f$  [Hz] kaavan 3.2 mukaan. (A-insinöörit, 2017)

$$R_0 = 20 \cdot \lg m + 20 \cdot \lg f - 47 \quad (3.2)$$

Taulukossa 1 on vertailtu puun ja betonin ääneneristävyysominaisuuksia. Puun ääneneristävyysominaisuudet eivät ole erityisen hyvät johtuen rakenteiden pienemmästä massasta. Lisäämällä ääntä vaimentavia eristekerroksia kuten mineraalivillaa, rakenteen massaa tai rakennekerroksia voidaan CLT-rakenteen ääneneristävyttä lisätä. Puun akustiikkaominaisuudet ovat toisaalta hyvät ja puurakenne antaa rakennukselle miellyttävän akustiikan ja äänimaailman. (A-insinöörit, 2017)

**Taulukko 1: CLT-levyn ja betonin ääneneristävyysvertailu.**

Ominaisuus	CLT	Betoni
Tiheys	500 $\text{kg/m}^3$	2 500 $\text{kg/m}^3$
Kimmomoduuli	11 600 MPa	27 000 MPa
Paksuus 60 mm		
-koinidenssin rajataajuus $f_{cr}$	220 Hz	320 Hz
-ilmääneneristävyys $R$ (500 Hz)	21 dB 26 dB	39 dB 44 dB
-ilmääneneristysluku $R_w$		
Paksuus 120 mm		
-koinidenssin rajataajuus $f_{cr}$	110 Hz	160 Hz
-ilmääneneristävyys $R$ (500 Hz)	32 dB 35 dB	50 dB 54 dB
-ilmääneneristysluku $R_w$		

(Taulukkoarvot: (A-insinöörit, 2017), Taulukko: Stenberg A.)

Puuvälipohjalle akustiikan osalta mitoittava tekijä on askelääneneristävyys. Askeläänieristävyyteen merkittävämmät tekijät ovat alakaton ripustustapa, kansilevyn massa ja lattiapäällyste, ilmapäällyste, villantäytön määrä ja kelluva lattia. Alakaton joustava

ripustustapa vaikuttaa askelääneneristävyyteen huomattavasti, joten välipohja ei välttämättä tarvitse kelluvaa lattiaa askelääneneristävyyden kannalta. Välipohjan kannalta on mahdollista saada puurakenne, joka on lähellä betonivälipohjan ääneneristävyyssominaisuutta. (A-insinöörit, 2017)

### 3.4 Palomitoitus

CLT-rakenteiden palomitoitusohjeistukset ovat pitkälti valmistajakohtaisia, koska yleistä palomitoitusohjeistusta ei ole vielä laadittu. Koko rakennuksen paloturvallisuuden suunnittelussa tulee noudattaa Ympäristöministeriön 1.1.2018 voimaan astunutta asetusta 848/2017 rakennuksen paloturvallisuudesta. Puufon Paloturvallinen puutalo -aineisto sisältää laajemmat ohjeet puurakennuksen paloturvallisuussuunnittelusta, pohjautuen paloturvallisuusmääräyksiin.

Rakennussuunnittelussa tulee määrittää rakennuksen paloluokka ja noudattaa palomääräysten asettamia vaatimuksia ja mitoitusarvoja. Paloluokan määrittävät esimerkiksi rakennuksen käyttötarkoitus, kerrosmäärä ja korkeus sekä rakennusmateriaalit. Rakennuksen paloluokituksen määrittävät kriteerit löytyvät Ympäristöministeriön paloturvallisuusmääräyksistä. CLT-runkoinen toimistorakennus voi käytännössä kuulua jokaiseen eri paloluokkaan. Taulukoissa 1, 2 ja 3 on esitetty puurunkoisten rakennusten vaatimuksia paloluokituksen mukaan. Suomessa yleisimmät toimistorakennukset ovat enintään 2- tai 3-8-kerroksisia, jotka kuuluvat paloluokkiin P2 ja P3, joten palosuunnittelussa voidaan käyttää taulukkomitoitusta. Taulukkomitoituksen asettamien vaatimusten perusteella voidaan valita rakennusmateriaalit ja paloluokka. (Puufon Oy - Paloturvallinen puutalo, 2018, s. 14)

#### Taulukko 2: Toimistokerrostalon paloteknisiä vaatimuksia puurungon osalta P3-luokassa.

P3	Sprinklaus	Pinta-ala [m <sup>2</sup> ]	Palo-osasto [m <sup>2</sup> ]	Kork. [m]	Krs. [kpl]	Hlö [kpl]	Runko
	-	≤ 2400	≤ 400	≤ 9	1	≤ 250	-
	Pakollinen	≤ 4800	≤ 1200	≤ 9	1	≤ 500	-
	-	≤ 1600	≤ 400	≤ 9	2	≤ 150	-
	Pakollinen	≤ 2400	≤ 600	≤ 9	2	≤ 150	-

(Taulukkoarvot: (Puufon Oy - Paloturvallinen puutalo, 2018, s. 20), Taulukko: Stenberg A.)

**Taulukko 3: Toimistokerrostalon paloteknisiä vaatimuksia puurungon osalta P2-luokassa.**

P2	Sprinklaus	Kerrosala [m <sup>2</sup> ]	Palo- osasto [m <sup>2</sup> ]	Kork. [m]	Krs. [kpl]	Hlö [kpl]	Runko
	-	-	≤ 2400	≤ 9	1	-	R 30
	Pakollinen	-	≤ 9600	≤ 9	1	-	R 30
	-	-	≤ 2400	≤ 9	2	-	R 30
	Pakollinen	-	≤ 4800	≤ 9	2	-	R 30
	Pakollinen	≤ 12 000	≤ 2400	≤ 28	3...8	≤ 1000	R 60

(Taulukkoarvot: (Puuinfo Oy - Paloturvallinen puutalo, 2018, s. 21), Taulukko: Stenberg A.)

**Taulukko 4: Toimistokerrostalon paloteknisiä vaatimuksia puurungon osalta P1-luokassa.**

P1	Palokuormaryhmä	Sprinklaus	Palo-osasto [m <sup>2</sup> ]	Krs. [kpl]	Runko
	alle 600 MJ/m <sup>2</sup>	-	≤ 2400	1...2	R 60
		Pakollinen	≤ 24000	1	R 60
		Pakollinen	≤ 12000	2	R 60

(Taulukkoarvot: (Puuinfo Oy - Paloturvallinen puutalo, 2018, s. 22), Taulukko: Stenberg A.)

P1 luokan, yli 2 kerroksisen puurakennuksen palosuunnittelussa tulee käyttää toiminnallista palomitoitusta. Toiminnallisessa palomitoituksessa otetaan huomioon rakennukselle todennäköisesti esiintyvät tilanteet, jolloin otetaan huomioon rakennuksen käyttötarkoitus ja ominaisuudet. Toiminnallinen palomitoitus on tavallisimmin käytännöllinen kun rakenneratkaisut halutaan kustannussäästöjen takia optimoida, tai rakennuksen rakennevaatimukset eivät sovellu taulukkomitoitukseen. Yleisimmät tapaukset, jolloin toiminnallista palomitoitusta vaaditaan ovat korkeat puukerrostalot, suuremmat halli- ja kokoontumistilat tai kun osa rakenteista halutaan ilman suojaverhouksia tai poikkeuksia pintaluokkavaatimukseen ja rakennusten välisiin minimietäisyyksiin. (Puuinfo Oy - Paloturvallinen puutalo, 2018, ss. 14-15)

CLT-levyllä on normaaliolosuhteissa noin 10-15% kosteuspitoisuus, joten palotilanteen syntyessä CLT-levy ei syty palamaan ennen kuin levyn kosteus on haihtunut. CLT-levyn

hiiltymisen nopeus vaihtelee levyn lamellikerrosten aiheuttamsta palovaiheisuudesta johtuen. Kun uloin lamelli- ja liimakerros on hiiltynyt, oletetaan sen putoavan pois ja hiiltymisnopeus kasvaa. Palomitoituksessa tulee huomioida CLT-rakenteen kuormituksen kantava tehollinen poikkileikkaus. Palon rasittaman levyn tulee säilyttää riittävä kantavuus vaaditun palonkestoajan. CLT-levyn uloimman lamellikerroksen tulisi olla riittävän paksu, ettei hiiltymissyvyys saavuta liimakerrosta vaaditun palonkestoajan aikana. Palomitoituksen kannalta rakenteen optimointiin vaaditaan usein palokestoajan ajan suojaava suojaverhous turhan massiivisten CLT-rakenteiden välttämiseksi. CLT-levyn pinnan paloluokitus on suojaverhoamattomana D-s2, d0. (Puuinfo Oy - Paloturvallinen puutalo, 2018, ss. 32, 92)

Ympäristöministeriön asetuksen (848/2017) rakennusten paloturvallisuudesta pykälän (24§) mukaan P2-paloluokan korkeintaan 2 kerroksisen rakennuksen sisäpinnat tulee olla suojattu B-s1, d0 materiaaleista tehdyllä suojaverhouksella. Yli 2 kerroksisen rakennuksen sisäpinnat on suojattava vähintään A-s1, d0-luokan materiaaleista tehdyllä suojaverhouksella. CLT-levyn pinnan paloluokitus ei täytä P2-luokan rakennusten määräysten mukaisia vaatimuksia, eikä rakenteen pintoja voida jättää suojaamatta. Tämä rajoittaa arkkitehtuurista suunnittelua P2-paloluokan rakennuksissa, koska CLT-levyn puupintoja ei voida esteettisesti hyödyntää. (Ympäristöministeriön asetus rakennuksen paloturvallisuudesta 848/2017)

Rakenteen palonsuojaaminen suojaverhouksella on usein tehokkain tapa tehdä myös liitoksista paloturvalliset. Mikäli suojaverhous on riittävä vaadittuun palonkesto aikaan, säilyttää liitosten liitinkiinnikkeet tarvittavan kestävyuden palonkestoajan aikana. CLT-liitoksen liittimet voidaan myös upottaa levyihin, jolloin liittimet ovat palolta suojattuja. Palosuojaamattoman rakenteen liitosten palomitoituksessa tulee huomioida liittimien riittävät kestävyudet palon aikana sekä hiiltymisen aiheuttaman rakenteen pienentyminen. Levyn hiiltyessä liitinten reunaetäisyydet ja rakenteen paksuus pienenevät. (Puuinfo Oy - Paloturvallinen puutalo, 2018, s. 93)

## 4 Suunnitteluohje

Tämä kappale sisältää yleistä tietoa CLT-suunnittelusta sekä kattavan lujuuslaskentaohjeistuksen oleellisille rakenteille. Lujuuslaskentaohjeistukset perustuvat CLT:tä koskeviin normeihin tai niihin perustuviin lisäohjeistuksiin sekä valmistajakohtaisiin laskentaohjeistuksiin. Lujuuslaskentaohjeistukset sisältävät kuormitetuille pysty- sekä vaakarakenteille huomioitavat kestävyyksien mitoitusohjeistukset.

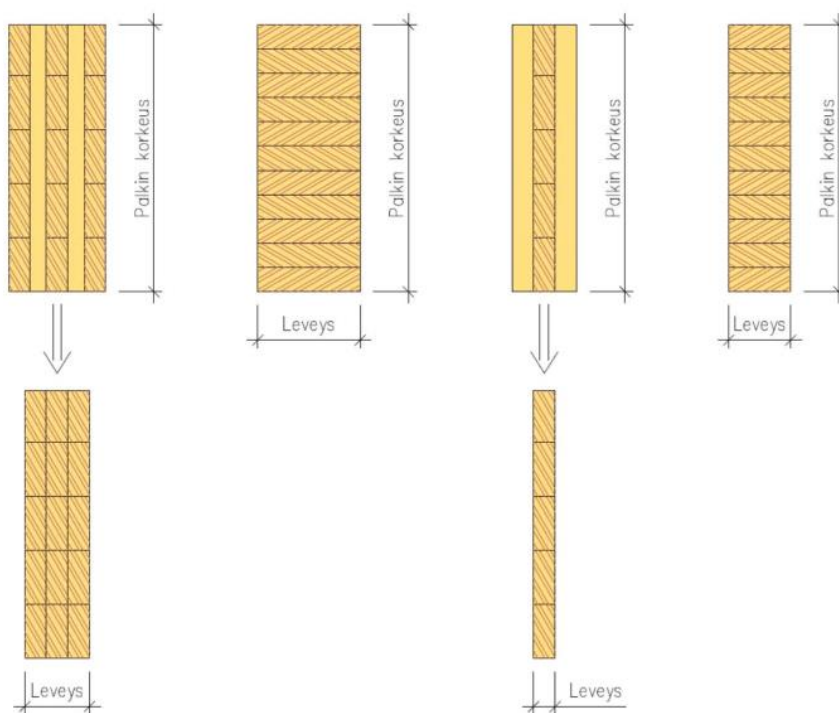
### 4.1 Yleistä suunnittelusta ja mitoituksesta

CLT-runkoisen rakennuksen suunnittelussa tulee noudattaa eurokoodi 5. puurakenteiden suunnitteluohjeita EN 1995-1-1 ja EN 1995-1-2, sekä suomen kansallista liitettä NA(FI). Rakennukseen kohdistuva kuormitukset tulee määrittää eurokoodi normien EN 1990 ja EN 1991 mukaan. Puurakenteiden suunnittelu RIL 205-1-2017 -kirjasta löytyy myös suunnitteluohjeistuksia CLT-rakenteille, jotka perustuvat eurokoodinormeihin ja Suomen rakennusmääräyksiin. CLT-rakenteiden lujuuslaskelmiin voidaan käyttää CLT-levyille annettuja mitoituskestävyyden arvoja. Rakenteiden mitoitukseen voidaan käyttää laskelmaohjelmistoja kuten esimerkiksi FEM-laskentaohjelmaa laattarakenteille. (Pontti Puutuotekeskus, 2012; RIL 205-1-2017)

CLT-levyt soveltuvat niin kantaviksi kuin ei kantaviksi rakenteiksi. Rakennuksen kantava runko voidaan tehdä pelkästään CLT-elementtejä käyttäen mutta elementit soveltuvat myös yhdistelmärakenteisiin muiden massiivipuurakenteiden sekä betoni- ja teräsrakenteiden kanssa käytettäväksi. CLT-levy soveltuu hyvin seinä-, välipohja- ja kattorakenteisiin sekä joissain tapauksissa myös rappukäytäviin ja hissikuiluihin. Kantavat CLT-seinärakenteet voidaan tehdä kerroksittain erillisinä elementteinä, jolloin vaakarakenne makaa seinärakenteen päällä. Seinärakenne toimii silloin sekä pystykuormien kantavana että jäykistävänä rakenteena. Yhdistelmärakenteissa CLT-elementit voivat olla koko rakennuksen korkuisia elementtejä yhdistettynä vaakarakennetta kantavan palkiston kanssa. CLT-seinäelementit toimivat rakennuksen jäykistävänä rakenteena ja mitoituksen salliessa voidaan vaakarakenteiden pystykuormat siirtää myös kantavaan seinään. (FPInnovations, 2019)

## 4.2 CLT-levytyypin valinta ja elementtimitoitus

CLT-rakenteen suunnittelussa levytyypin valintaa määrittää usein rakenteen kuormitus ja rakenneratkaisut. Levytyypin valinnassa tulee huomioida lujuuskestävyys, paloturvallisuus ja rakennusfysikaaliset ominaisuudet. CLT-runkoinen kerrostalorakenne koostuu tavallisesti kerroksittain erillisistä seinäelementeistä ja välipohjalevyistä. Levytyypin valinnassa tulee huomioida kantavan suunnan tehollinen poikkileikkaus. Esimerkiksi seinäelementeissä tulee pintalamellit olla pystysuuntaisia ja vaakarakenteissa jännevälisuuntaisia. CLT-levyyn tehtävät aukotukset seinissä ja välipohjissa on mahdollista tehdä joustavasti levyn jäykkyyden ansiosta. CLT ei sovellu pieniin palkkeihin tai pilareihin johtuen tehollisesta poikkileikkauksesta. Tämä on esitetty kuvassa 4, jossa verrataan CLT- ja liimapuupalkin tehollisiä poikkileikkauksia. Tehollisesta poikkileikkauksesta löytyy lisätietoa käsikirjan kappaleesta 4.3. (FPInnovations, 2019; Lahtela, 2017)



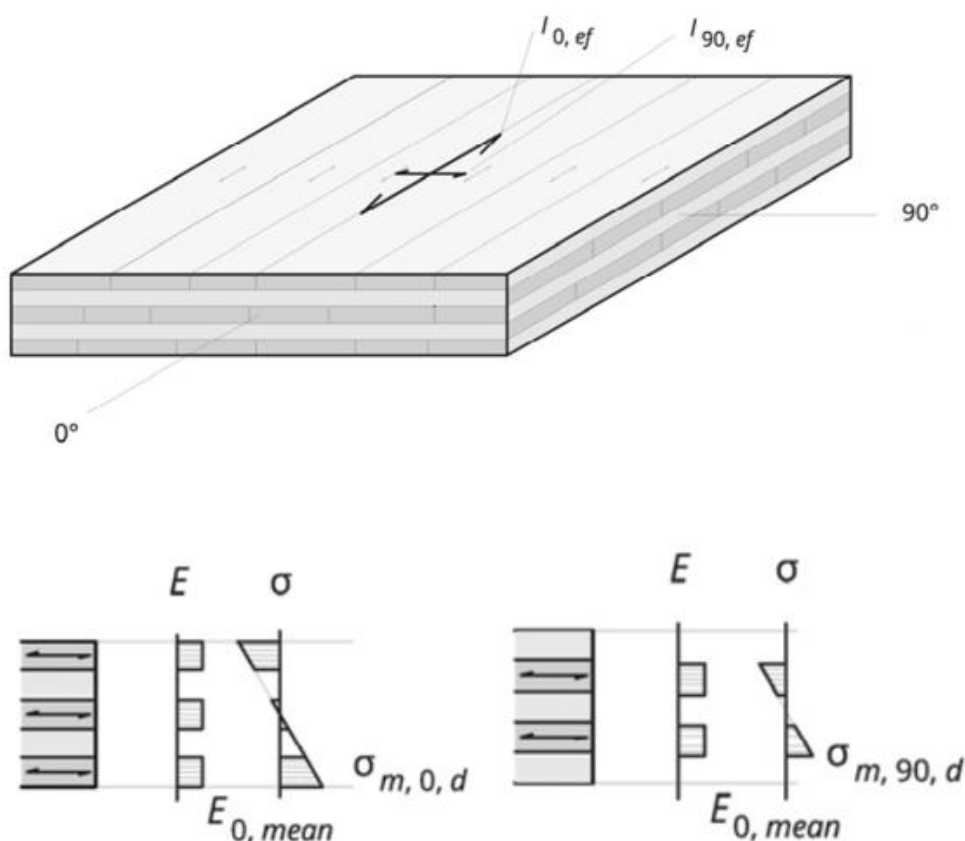
Kuva 4: CLT-palkin poikkileikkauksen vertaus liimapuupalkkiin. (Lahtela, 2017)

CLT-elementtien tehtaalla tapahtuva esivalmistus tekee elementtien asentamisesta nopeaa. CLT-levystä on mahdollista tehdä tilaelementtejä, jolloin elementteihin voidaan jo tehtaalla asentaa talotekniikkaa, sisäverhoilua, kiintokalusteita sekä ikkunat ja ovet, joten rakennusprosessi nopeutuu entisestään. CLT-elementtisuunnittelussa on tärkeää huomioida CLT-levyjen maksimi- ja minimimitat. CLT-levyjä valmistetaan tietyillä mitoilla, riippuen valmistajasta. Arkkitehdin tulee mitoittaa elementtien kappalejaot alusta alkaen, jotta hukkaa syntyy niin vähän kuin mahdollista. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd; Stora Enso, 2014)

### 4.3 CLT-rakenteen lujuuslaskenta

CLT-rakenteen lujuuslaskennassa perustana tulee noudattaa eurokoodinormeja, puurakenteiden suunnitteluohjetta EN 1995-1-1. Euronormit ovat CLT-suunnittelun kannalta puutteelliset, jolloin valmistajakohtaisia ohjeistuksia voidaan käyttää. Lujuuslaskennan lisäohjeistuksia löytyy myös kirjasta RIL 205-1-2017, sekä ulkomaalaisista CLT-käsikirjoista. (Pontti Puutuotekeskus, 2012)

CLT-levyn poikkileikkausmitoituksessa huomioitavaa on, että vain kerrokset, joiden syyssuunnat ovat saman suuntaiset kuin kuormituksen aiheuttamat jännitykset, lasketaan kuormia kantavana poikkileikkauksena kuvan 5 mukaan. Kuormituksen aiheuttamat jännitykset on myös huomioitava leikkausmuodonmuutoksen kannalta. Ominaislujuuksien ja jäykkyyden arvoina käytetään C24 sahatavaran standardiarvoja. Syrjä- ja lapeleikkauslujuuksien arvot levytyypeille saadaan valmistajan antamasta taulukoista. (Kevarinmäki, 2017a)



Kuva 5: CLT-levyn tehollisen poikkileikkauksen jännitysten jakautuminen. (proHolz Austrian, 2014)

CLT-levyn lapemitoituksessa mitoitetaan levyn taivutuskestävyys laskemalla kuormituksen aiheuttaman taivutusjännityksen. Liimasauman tasoleikkausjännitys tulee laskea ja mitoitaa tasoleikkauskestävyyden kannalta. Leikkauskestävyydet tulee mitoitaa poikkileikkauksen leikkausvoimasta rasitetuille pituussuuntaisille kerroksille, C24 sahatavaran leikkauslujuuden mukaan. Mitoituksen kattavampi laskentaohjeistus löytyy RIL 205-1-2017:stä ja valmistajakohtaisista ohjeistuksista. (Kevarinmäki, 2017a)

CLT-levyn syrjämitoituksessa mitoitetaan taivutus-, puristus- ja vetokestävyydet samansuuntaisille kerroksille kuormituksenjännityksen kanssa. Leikkauskestävyydet mitoitetaan taulukoitujen syrjäleikkauslujuuksien mukaan. Pituussuuntaiset lamellit huomioidaan taivutetun sauvan kiepahduskestävyyttä mitoittaessa. Lisäohjeistuksia mitoitukseen löytyy RIL 205-1-2017:stä ja valmistajakohtaisista ohjeistuksista. (Kevarinmäki, 2017a)

#### 4.3.1 Teholliset poikkileikkausvakiot

CLT-rakenteen mitoituksessa tulee huomioida rakenteen tehollinen poikkileikkaus. CLT-levyn ristiliimattujen lamellien ansiosta rakenteen kantavuus muodostuu jännityksen suuntaisista lamellikerroksista, joka on esitetty kuvissa 4 ja 5. Tehollinen poikkileikkaus tulee määrittää laskentakohteittain riippuen kuormituksesta sekä mitoitettavasta kestävydestä. Poikittaissuuntaiset lamellit aiheuttavat poikkileikkauksessa liukumaa ja kuormittavat siten tehollisia lamelleja syyssuuntaan, joka alentaa taivutusjäykkyyttä. CLT-levyn teholliselle poikkileikkaukselle määritetään teholliset poikkileikkausvakiot kaavoista (4.1...4.8), joissa lasketaan tehollinen jäyhyysmomentti ja taivutusvastus sekä teholliset staattiset momentit. Symmetrisen viisikerroksisen CLT-levyn mitoituksessa voidaan käyttää RIL 205-1-2017 mukaista joustavasti kootun kerrospalkin teoriaa. (Kevarinmäki, 2017a; RIL 205-1-2017, s. 147)

Symmetrisen viisikerroksisen CLT-levyn tehollinen jäyhyysmomentti voidaan laskea kaavalla: (Kevarinmäki, 2017a)

$$I_{ef,L} = \sum_1^3 (I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad [\text{mm}^4] \quad (4.1)$$

Kaavaa 4.1 voidaan lyhentää kaavaan 4.2 mukaisesti, kun kyseessä on symmetrinen 5-kerroksinen CLT-levy mikä tarkoittaa, että poikkileikkauksen uloimpien lamellien jäyhyysmomentit ovat samat,  $I_{y,1} = I_{y,3}$ : (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015a)



$$I_{ef,L} = 2 \cdot I_{y,1} + I_{y,2} \quad [\text{mm}^4] \quad (4.2)$$

Jossa yksittäisten lamellien tehollinen pinta-ala kaavasta:

$$A_i = b \cdot h_i \quad [\text{mm}^2] \quad (4.3)$$

Ja yksittäisten lamellien tehollinen jäyhyysmomentti kaavasta:

$$I_{y,i} = \frac{b \cdot h_i^3}{12} \quad [\text{mm}^4] \quad (4.4)$$

Symmetrisessä viisikerroksisessa levyssä, liitosten hyötysuhde kertoimet kaavasta: (Kevarinmäki, 2017a)

$$\gamma_1 = (\gamma_3) = \frac{1}{1 + \left( \frac{\pi^2 \cdot E_{0,mean} \cdot A_1}{L^2} \cdot \frac{t}{G_{R,mean} \cdot b} \right)} \quad (4.5)$$

$$\gamma_2 = 1$$

Missä:

$E_{0,mean}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	lamellin kimmomoduuli
$G_{R,mean}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	tasoleikkauksen liukumoduuli
$L$	[mm]	jänneväli
$t$	[mm]	poikittaissuuntaisen lamellin paksuus
$b$	[mm]	tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys
$h_i$	[mm]	tarkasteltavan lamellin paksuus
$a_i$	[mm]	tehollisen lamellin painopisteen etäisyys neutraaliakseliin

Tehollinen taivutusvastus kaavasta: (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015a)

$$W_{ef,L} = \frac{I_{ef,L}}{\gamma_i \cdot a_i + d_i} \quad [\text{mm}^3] \quad (4.6)$$

Jossa:

$$d_i = h_1/2$$

Tehollinen staattinen momentti kaavasta: (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015a)

$$S_{ef,1} = A_1 \cdot \gamma_1 \cdot a_1 \quad [\text{mm}^3] \quad (4.7)$$

$$S_{ef,2} = A_1 \cdot \gamma_1 \cdot a_1 + \frac{A_2}{2} \cdot a_2$$

Tehollinen pinta-ala on summa poikkileikkauksen tehollisista lamellikerroksista kaavasta:

$$A_{ef} = \sum A_i \quad [\text{mm}^2] \quad (4.8)$$

Kolmikerroksisen CLT-levyn tehollisen poikkileikkaukseen ei kuulu keskeistä lamellikerrosta, joten sitä ei tarvitse huomioida tehollisen poikkileikkausvakioiden laskennassa. (Kearinmäki, 2017a)

### **Enemmän kuin 5-kerroksisen CLT-levyn tehollinen poikkileikkaus**

Kun CLT-levy koostuu enemmän kuin viidestä kerroksesta joudutaan käyttää laajennettua teoriaa. Laajennetussa teoriassa lasketaan teholliset hyötysuhdekertoimet poikkileikkauksen tehollisille lamellikerroksille. Jännevälisuuntaisten lamellikerrosten paksuuden vaihtelevuus ja kimmomoduuli saattaa vaihdella, joka vaikuttaa hyötysuhdekertoimen arvoon. Myös poikittaissuuntaisten lamellien paksuuden vaihtelevuus ja eroavaisuudet liukumoduulissa vaikuttavat hyötysuhdekertoimeen. Symmetrisessä poikkileikkauksessa, jossa samansuuntaisten lamellikerrosten paksuus on sama, sekä jossa kimmomoduuli ja liukumoduuli ovat samat, pystytään laajennetun teorian laskelmaa tekemään huomattavasti helpommaksi. Tämä ilmenee liitteen 2 laskentaesimerkistä 7-kerroksiselle poikkileikkaukselle. (proHolz Austrian, 2014, s. 181)

Poikkileikkauksen kokonaispainopisteen etäisyys poikkileikkauksen yläreunaan tulee määrittää kaavalla 4.9. Symmetrisessä poikkileikkauksessa etäisyys  $z_s$  on puolet poikkileikkauksen korkeudesta. Lamellikerrosten painopisteen etäisyydet kokonaispainopisteeseen kaavasta: (proHolz Austrian, 2014, s. 181)

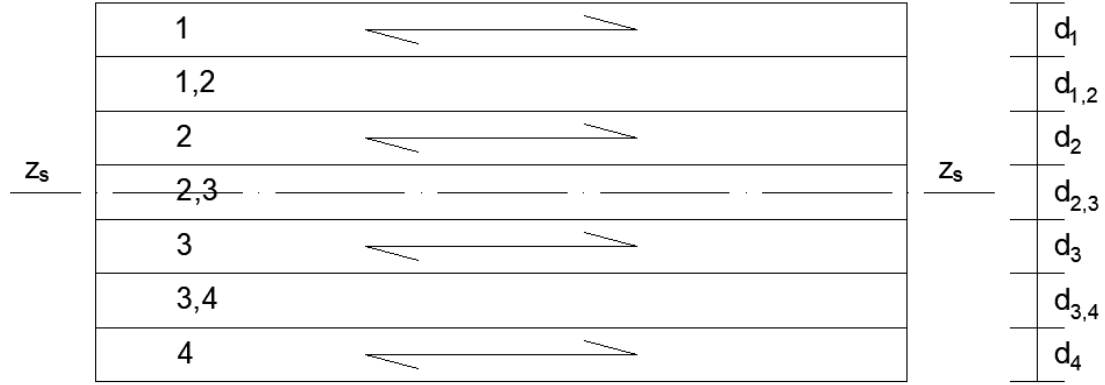
$$z_s = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} \quad [\text{mm}] \quad (4.9)$$

Jossa:

$y_i$  [mm] yksittäisen tehollisen lamellikerroksen painopisteen etäisyys poikkileikkauksen yläreunaan.

Jännevälisuuntaisten lamellien painopisteen etäisyys poikkileikkauksen kokonaiseen painopisteeseen: (proHolz Austrian, 2014, s. 181)

$$a_i = y_i - z_s \quad [\text{mm}] \quad (4.10)$$



Kuva 6: 7-lammellikerroksisen CLT-levyn numerointi. (Kuva: Stenberg. A)

Kuvassa 6 on esitetty 7-kerroksinen CLT-levy. Kuvassa jännevälisuuntaiset lamellikerrokset ovat numeroituna kokonaisluvuilla  $i$  ja poikittaiset lamellikerrokset ovat numeroituna desimaaliluvuilla  $i,i$ . Kuvassa esitetyt  $d_i$  ja  $d_{i,i}$  ovat lamellikerrosten paksuudet, jotka on numeroitu lamellikerrosnumeroinnin mukaan.

Laajennetussa teoriassa liitosten hyötysuhdekerroin lasketaan kaavasta 4.11, jossa lamellien hyötysuhdetoimet saadaan käyttäen matriisi funktiota. (proHolz Austrian, 2014, s. 182)

$$[V] \cdot \gamma = s \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & v_{3,2} & v_{3,3} & v_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & v_{n,n-1} & v_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix}$$

Jossa: (proHolz Austrian, 2014, s. 182)

$$C_{j,k} = \frac{b \cdot G_{R,jk}}{d_{j,k}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.12)$$

$$D_i = \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot b \cdot d_i}{l_{ref}^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.13)$$

$$v_{i,i-1} = -C_{i-1,i} \cdot a_{i-1} \quad [\text{N/mm}] \quad (4.14)$$

$$v_{i,i} = (C_{i-1,i} + C_{i,i+1} + D_i) \cdot a_i \quad [\text{N/mm}] \quad (4.15)$$

$$v_{i,i+1} = -C_{i,i+1} \cdot a_{i+1} \quad [\text{N/mm}] \quad (4.16)$$

$$s_i = C_{i,i+1} \cdot (a_{i+1} - a_i) + C_{i-1,i} \cdot (a_i - a_{i-1}) \quad [\text{N/mm}] \quad (4.17)$$

$G_{R,jk}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	poikittaislamellin $d_{i,i}$ liukumoduuli
$d_{j,k}$	[mm]	poikittaislamellin $d_{i,i}$ paksuus, kts. kuva 6
$E_i$	[N/mm <sup>2</sup> ]	jännevälisuuntaisen lamellin $i$ kimmomoduuli
$d_i$	[mm]	jännevälisuuntaisen lamellin $i$ paksuus, kts. kuva 6

Symmetrisessä poikkileikkauksessa, samansuuntaisten lamellikerrosten ollessa paksuudeltaan ja ominaisuuksiltaan identtiset, on kimmomoduuli  $E_i$  sama jokaiselle kerrokselle, joten  $D_i$  on kaikille kerroksille sama. Poikittaiskerrosten liukumoduuli  $G_{R,jk}$  voidaan symmetrisessä poikkileikkauksessa myös olettaa olevan sama jokaiselle kerrokselle sama, joten  $C_{j,k}$  on sama jokaiselle lamellikerrokselle. (proHolz Austrian, 2014)

Kaavan 4.11 matriisin  $v_{i,i}$  ja  $s_i$  indeksien mukaan laitetaan oikeat kaavat matriisiin periaatteella jossa indeksin ensimmäinen arvo on lamellin numero, ja desimaaliarvo määrittää käytettävää kaavaa.

$$i,i = 1.1$$

$$i,i-1 = 2.1$$

$$i,i+1 = 1.2$$

V matriisien kaavat lasketaan  $C_{j,k}$ ,  $a_i$  ja  $D_i$  arvojen perusteella ja laitetaan kaavan 4.11 matriisiin indeksoinnin mukaisesti, esimerkiksi:

$$v_{1,1} = (C_{1,2} + D_1) \cdot a_1$$

$$v_{2,1} = -C_{1,2} \cdot a_1$$

$$v_{3,4} = -C_{3,4} \cdot a_4$$

$$s_3 = -C_{3,4} \cdot (a_4 - a_3) + C_{2,3} \cdot (a_3 - a_2)$$

Kaavan 4.18 mukaisesta matriisin laskusta saadaan lamellikohtaisesti liitosten hyötysuhdekertoimet  $\gamma_i$ , jotka voidaan laittaa kaavaan 4.1 ja saada enemmän kuin viisikerroksisen levyn tehollinen jäyhyysmomentti. (proHolz Austrian, 2014, s. 182)

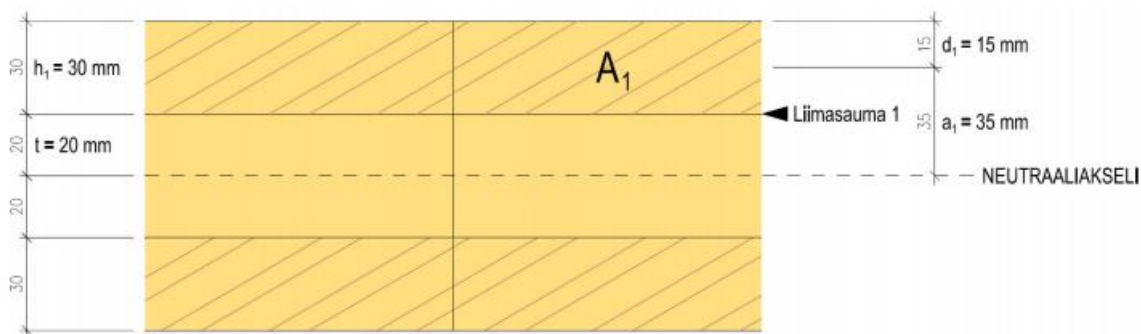
$$\gamma_i = [V_i]^{-1} \cdot s_i \quad (4.18)$$

Käsikirjaan liite 2 sisältää 7-lamellikerroksisen CLT-levyn tehollisen poikkileikkauksen laskentaesimerkin, joka käy laskentamenetelmää perusteellisemmin läpi. Laskentaesimerkistä voidaan tarkastella kuinka lamellikerrosten paksuudet sekä liuku- ja kimmomoduulit vaikuttavat tehollisen poikkileikkauksen ominaisuuksiin, ja symmetrisen poikkileikkauksen merkitystä laskennan suorittamisessa. Laskentaesimerkistä saadaan laskettua 7-kerroksisen CLT-levyn tehollinen jäyhyysmomentti ja taivutusjäykkyys.

#### 4.4 Seinäelementin kestävyys

CLT-rakenteen elementtiseinään kohdistuu pystykuorma ylläolevasta rakenteesta ja lumikuormasta sekä vaakakuorma tuulesta lappeen ja syrjäsuuntaan. Seinän mitoituksessa tulee mitoittaa seinän nurjahduskestävyys, liimasauman leikkauskestävyys, tuulikuorman aiheuttama taipuma, tukipainekestävyys ja jäykistävän seinän kestävyys. (Kevarinmäki, 2017a)

Lappeeseen kohdistuessa pystykuormitus tarkastellaan vain CLT-levyn pystysuuntaisten lamellien kestävyys. Poikkileikkaukselle tulee määrittää teholliset poikkileikkausvakiot, liukuman alentaessa taivutusjäykkyyttä. Poikkileikkausvakioiden laskenta on esitetty käsikirjan kappaleessa (4.3.1). (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015a)



Kuva 7: CLT-seinälevyn poikkileikkaus. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015a)

Kuvan 7 mukaiset arvot 3-kerroksisen CLT-seinälevyn laskennassa: (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015a)

$L$	[mm]	seinän korkeus
$t$	[mm]	liimasauman etäisyys neutraaliakseliin
$b$	[mm]	tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys (1000mm)

$h_1$	[mm]	pystysuuntaisen lamellin paksuus
$a_1$	[mm]	tehoillisten lamellien painopisteen etäisyys neutraaliakseliin
$\psi_0$		tuulikuorman aiheuttama yhdistelykerroin
$d_i = h_1/2$	[mm]	

#### 4.4.1 Seinän nurjahduskestävyys

Seinän nurjahduskestävyyden mitoituksessa tarkastellaan 1m leveää kaistaa CLT-seinälevystä. Nurjahduksen kaavat (4.19...4.30) on sovellettu RIL 205-1-2017 ja Crosslam Kuhmon laskentaohjeiden mukaan. (RIL 205-1-2017, ss. 79-82; Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015a)

$L_{c,z}$	[mm]	nurjahduspituus z-akselin suunnassa
$f_{c,0,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	lamellin puristuslujuus valmistajan antamasta taulukosta
$f_{m,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	lamellin taivutuslujuus valmistajan antamasta taulukosta
$E_{0,05}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	lamellin kimmomoduuli viiden prosentin fraktiilia alemmaa
$k_{mod}$		hetkellinen aikaluokka / käyttöluokka
$\gamma_M$		materiaalin osavarmuusluku
$\beta_c$		alkukäyryyskerroin

Kuormanjakoluku: (Kevarinmäki, 2017a)

$$k_{sys} = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 + 0,0025 \cdot n \\ 1,2 \end{array} \right.$$

Jossa:

$n$  tarkasteltavan poikkileikkauksen vierekkäisten lamellien määrä

$$i_y = \sqrt{\frac{I_{ef,L}}{A_{ef}}} \quad [\text{mm}] \quad (4.19)$$

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y} \quad (4.20)$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (4.21)$$

$$k_y = 0,5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad (4.22)$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \leq 1 \quad (4.23)$$

Syyssuunnan puristusjännitys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{q_d}{A_{ef}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.24)$$

Tuulikuormasta aiheutuva taivutusjännitys: (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015a)

$$q_{w,d} = 1,5 \cdot \psi_0 \cdot q_{w,k} \quad [\text{kN/m}] \quad (4.25)$$

$$M_{y,d} = \frac{q_{w,d} \cdot L^2}{8} \quad [\text{kN m}] \quad (4.26)$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{ef,L}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.27)$$

CLT-levyn puristus- ja taivutuslujuudet RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella. (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.28)$$

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.29)$$

Seinän nurjahduskestävyys tulee toteuttaa ehto:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (4.30)$$

#### 4.4.2 Aukkopalkin kestävyys

Ikkuna-aukkopalkin mitoituksessa taivutusjännityksen tarkastelussa huomioidaan ainoastaan jännevälisuuntaiset lamellikerrokset. Leikkauskestävyyden mitoituksessa tarkastellaan koko aukkopalkin poikkileikkausta. Tässä kappaleessa tarkastellaan yksiaukkoisen aukkopalkin kestävyyttä. Aukkopalkin mitoituksen kaavat (4.31...4.50) ovat sovellettu käyttäen tavanomaisen yksiaukkoisen palkin laskentamenetelmää sekä Crosslam Kuhmon laskentaohjeita. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015b)

$b_{ef}$  [mm] jännevälisuuntaisten lamellien paksuus

$h$  [mm] aukkopalkin korkeus

Tehollinen jäyhyysmomentti:

$$I_{ef,y} = \frac{b_{ef} \cdot h^3}{12} \quad [\text{mm}^4] \quad (4.31)$$

Tehollinen taivutusvastus:

$$W_{ef,y} = \frac{b_{ef} \cdot h^2}{6} \quad [\text{mm}^3] \quad (4.32)$$

### Aukkopalkin taivutuskestävyys

Palkin taivutusjännitys:

$$M_{y,d} = \frac{q_d \cdot L^2}{8} \quad [\text{kN m}] \quad (4.33)$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{ef,y}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.34)$$

Palkin taivutuslujuus RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella: (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.35)$$

Taivutuslujuus tulee olla suurempi kuin taivutusjännitys  $f_{m,d} > \sigma_{m,y,d}$  :

### Aukkopalkin leikkauskestävyys

Aukkopalkin leikkauskestävyyden mitoituksessa käytetään koko palkin poikkileikkausta.

$k_{cr}$		halkeilukerroin
$b$	[mm]	palkin leveys
$h$	[mm]	palkin korkeus
$f_{v,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	levyn leikkauslujuus valmistajan antamasta taulukosta

Aukkopalkin poikkileikkauspinta-ala leikkausmitoituksessa:

$$A = k_{cr} \cdot b \cdot h \quad [\text{mm}^2] \quad (4.36)$$

Leikkausvoima:

$$V_d = \frac{q_d \cdot L}{2} \quad [\text{N}] \quad (4.37)$$

Palkin leikkausjännitys:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.38)$$



Palkin leikkauskestävyys RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella: (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.39)$$

Leikkauskestävyys tulee olla suurempi kuin leikkausjännitys  $f_{v,d} > \tau_d$ .

### Aukkopalkin taipuma

Aukkopalkin omapainosta aiheutuva hetkellinen taipuma:

$$w_{inst,g} = \frac{5}{384} \cdot \frac{g_k \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_{ef,L}} \quad [\text{mm}] \quad (4.40)$$

Aukkopalkin hyötykuormasta aiheutuva hetkellinen taipuma yksiaukkoiselle palkille:

$$w_{inst,q} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_k \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_{ef,L}} \quad [\text{mm}] \quad (4.41)$$

Hetkellinen taipuma:

$$\Sigma w_{inst} = w_{inst,g} + w_{inst,q} \quad [\text{mm}] \quad (4.42)$$

Lopullinen taipuma:

$$\Sigma w_{fin} = w_{inst,g} \cdot (1 + k_{def}) + w_{inst,q} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \quad [\text{mm}] \quad (4.43)$$

Jossa:

$k_{def}$  virumakerroin syrjällään taivutuksessa

$\psi_2$  muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin

Lopullinen taipuminen tulee täyttää vaatimus enimmän sallitun taipuman raja-arvosta kansallisen liitteen NA(FI) EN 1995-1-1 mukaan. Pääkannattimille  $w_{fin} < L/300$ . (RIL 205-1-2017, s. 98)

### Aukkopalkin kiepahduskestävyys

CLT-seinäelementti on yleensä kiinnitetty muuhun rakenteeseen koko elementin ympäri. Tavanomaisesti ikkuna-aukkopalkki on kiepahdustuettu, jolloin kiepahduskestävyyttä ei tarvitse tarkastaa. Mikäli kiepahdustuentaa ei ole tarkistetaan kiepahduskestävyys. Riippuen CLT-levytyypistä tulee tehollinen poikkileikkaus määrittää. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015b)

Tehollinen jäyhyysmomentti lasketaan z-akselin suhteen.

$$I_{ef,z} = \frac{b_{ef} \cdot h^3}{12} \quad [\text{mm}^4] \quad (4.44)$$

Taivutusvastus y-akselin suhteen:

$$W_{ef,y} = \frac{b_{ef} \cdot h^2}{6} \quad [\text{mm}^3] \quad (4.45)$$

Vääntöjäyhyysmomentti: (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015b)

$$I_{tor} = \frac{h \cdot b_{ef}^3 \cdot \left(1 - 0,63 \cdot \frac{b_{ef}}{h}\right)}{3} \quad [\text{mm}^4] \quad (4.46)$$

Jossa:

$b_{ef}$  [mm] tehollisen poikkileikkauksen leveys

$h$  [mm] aukkopalkin korkeus

Kriittinen taivutusjännitys: (RIL 205-1-2017, s. 83)

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_{ef,z} \cdot G_{0,05} \cdot I_{tor}}}{l_{ef} \cdot W_{el,y}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.47)$$

Jossa:

$E_{0,05}$  [N/mm<sup>2</sup>] lamellin kimmomoduuli viiden prosentin fraktiilia alempaa

$G_{0,05}$  [N/mm<sup>2</sup>] lamellin luikumoduuli viiden prosentin fraktiilia alempaa

Jännitystarkastus: (RIL 205-1-2017, s. 83)

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (4.48)$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \cdot \lambda_{rel,m} \quad (4.49)$$

Jännitystarkastuksessa tarkistetaan, että seuraava ehto toteutuu: (RIL 205-1-2017, s. 83)

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} \cdot f_{m,d} \quad (4.50)$$

CLT ei yleensä sovellu palkki- tai pilarirakenteeksi tehollisen poikkileikkauksen takia. Hyvin todennäköistä on, että kiepahduskestävyyslaskenta osoittaa, että aukkopalkki tulee olla kiepahdustuettu. Tavallisesti CLT-elementin aukkopalkki on kiepahdustuettu joka tapauksessa.

#### 4.4.3 Leikkauskestävyys seinälevyn liimasaumassa

CLT-levyn liimasaumaan syntyy poikittaislamelliin leikkausjännitys, johtuen tuulikuormasta. Leikkausjännitys voidaan olettaa samaksi koko lamellissa, joten jännitys on sama neutraaliakselissa kuin liimasaumassa. Alla olevat kaavat (4.51...4.53) on sovellettu RIL 205-1-2017 ja RIL lisäohjeiden mukaan. (RIL 205-1-2017, s. 74; Kevarinmäki, 2017a)

$f_{R,k,0}$  [N/mm<sup>2</sup>] valmistajan antaman tasoleikkauslujuus

Tuulikuorman aiheuttama leikkausvoima:

$$V_d = \frac{q_{w,d} \cdot L}{2} \quad [\text{N}] \quad (4.51)$$

Levyn leikkausjännitys: (Kevarinmäki, 2017a)

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S_{ef,1}}{I_{ef,L} \cdot b} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.52)$$

Levyn tasoleikkauslujuus RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella: (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{R,d,0} = \frac{k_{mod} \cdot f_{R,k,0}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.53)$$

Tasoleikkauslujuus tulee olla suurempi kuin leikkausjännitys  $f_{R,d,0} > \tau_d$ :

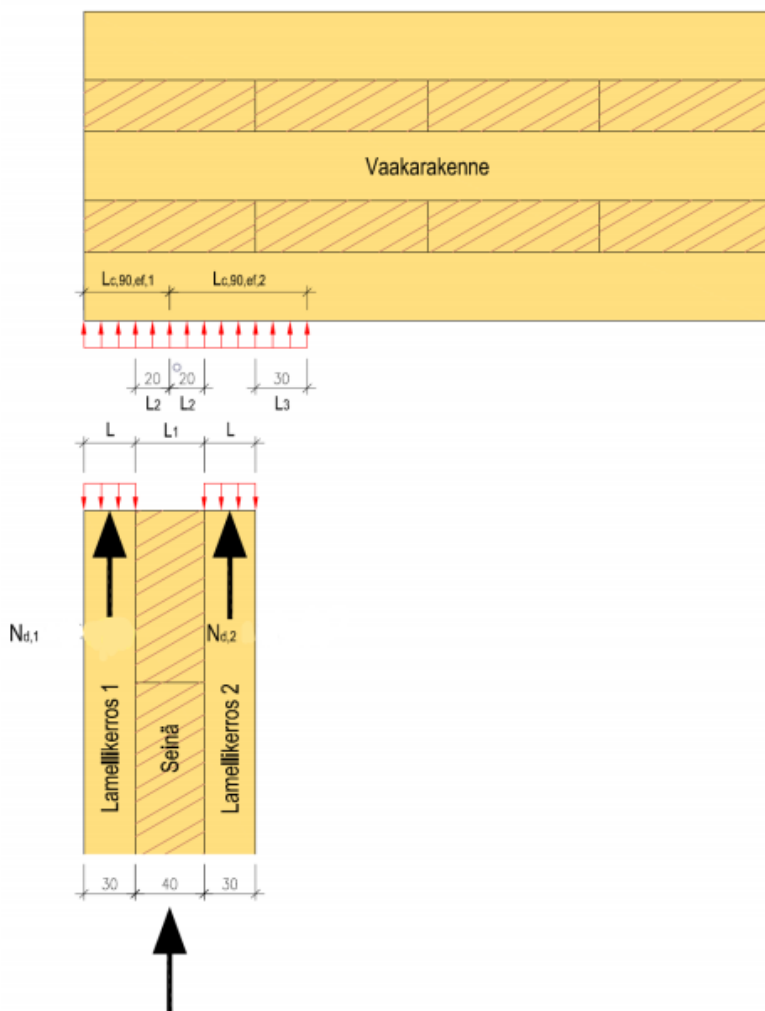
#### 4.4.4 Tuulikuorman aiheuttama taipuma

$$u_{inst,w} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(\psi_0 \cdot q_{w,k}) \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_{ef,L}} \quad [\text{mm}] \quad (4.54)$$

Taipuminen tulee täyttää enimmän sallitun taipuman raja-arvon vaatimukset kansallisen liitteen NA(FI) EN 1995-1-1 mukaisesti. Pääkannattimille  $u_{inst,w} < L/300$ . (RIL 205-1-2017, s. 98)

#### 4.4.5 Seinän tukipainekestävyys

CLT-rakenteen seinän ja välipohjarakenteen tukipainekestävyys tulee mitoittaa kestäämään tukireaktion aiheuttaman paineen rakenteeseen.



Kuva 8: CLT-seinä- ja -välipohjarakenteen välinen tukireaktio. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015c)

Tukipainekestävyyttä mitoittaessa CLT-seinärakenteessa ainoastaan pystysuuntaiset lamellit rasittuvat tukipaineesta, joka on esitetty kuvassa 8. Tukipainekestävyyden kaavat ovat sovellettu RIL-1-2017 ja Crosslam Kuhmon laskentaohjeistusta. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015c; RIL 205-1-2017, ss. 72-73)

$L_{c,0,ef}$	[mm]	seinän tehollinen kosketuspinnan pituus (kuvan mukaan $L+L$ )
$f_{c,0,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	lamellien puristuslujuus, valmistajan antamasta taulukosta
$b$	[mm]	tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys, 1000 mm
$N_d$	[N]	tukireaktion voima

Tehollinen pinta-ala:

$$A_{ef} = L_{c,0,ef} \cdot b \quad [\text{mm}^2] \quad (4.55)$$

Puristusjännitys seinässä:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{ef}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.56)$$

Seinän puristuskestävyys RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella: (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.57)$$

Puristuskestävyys tulee olla suurempi kuin puristusjännitys  $f_{c,0,d} > \sigma_{c,0,d}$

#### 4.4.6 Jäykistävän seinän kestävyys

Jäykistävän seinäelementin tulee kesää niihin kohdistuvat vaaka- ja pystysuuntaiset kuormat. Seinä tulee olla tuettu, jotta rakenne ei pääse liikkumaan. Jäykistysseinät tulee mitoittaa siten, ettei kuormitus aiheuta rakenteelle vaurioita, jotka vaikuttavat rakenteen käyttötarkoitukseen. CLT soveltuu hyvin jäykistäväksi seinärakenteeksi kahteen suuntaan kantavan ristiliimauksen ansiosta. Suunnitteluvaiheessa tulee CLT levyn leikkauskestävyys laskea ja mitoittaa kestävänsä vaakaleikkauskuormat.

Jäykistävän seinän kestävyyslaskennassa tehollisena poikkileikkauksena voidaan käyttää koko poikkileikkausta. Seinän tehollisena jäykisteenä toimii kokonaiset seinälevyt, joten aukotukset tulee huomioida. Jäykistävän seinän laskennan kaavat (4.58...4.62) on otettu ja sovellettu RIL 205-1-2017 ja Crosslam Kuhmon laskentaohjeita. (RIL 205-1-2017, ss. 74-75; Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015d)

$k_{cr}$		halkeilukerroin (CLT = 1,0) (RIL 205-1-2017, s. 75)
$L$	[mm]	tehollisen jäykisteen pituus
$t$	[mm]	CLT levyn paksuus
$b_{ef} = k_{cr} \cdot t$	[mm]	halkeilua huomioiva tehollinen leveys

Jäykisteen tehollinen poikkileikkausala:

$$A = b_{ef} \cdot L \quad [\text{mm}^2] \quad (4.58)$$

### Jäykistävän seinän leikkauskestävyys

$f_{v,k}$  [N/mm<sup>2</sup>] seinälevyn leikkauslujuus syrjällään

$V_d = F_{y.Ed}$  [N] jäykistävän seinän yläreunaan kohdistuva mitoittava kuorma

Seinän leikkausjännitys:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{A} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.59)$$

Seinän leikkauslujuus RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella: (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.60)$$

Leikkauslujuus tulee olla suurempi kuin leikkausjännitys  $f_{v,d} > \tau_d$  :

### Jäykistävän seinän leikkaussiirtymä

$G_{mean}$  [N/mm<sup>2</sup>] liukumoduuli

$L$  [mm] jäykisteen tehollinen pituus

$H$  [mm] jäykistävän seinän korkeus

$V_k = F_{y.Ek}$  [N] jäykistävään seinän kohdistuva ominaisvaakakuorma

Leikkausjäykkyys:

$$C_v = \frac{1}{\left(\frac{H}{G_{mean} \cdot L \cdot t}\right)} \quad [\text{N/mm}] \quad (4.61)$$

Jäykistävän seinän leikkaussiirtymä:

$$u_{inst} = \frac{V_k}{C_v} \quad [\text{mm}] \quad (4.62)$$

Jäykistävän CLT-seinän taivutusmomentin ja seinä-vaakarakenne liitoksen siirtymät tulee myös tarkastaa jäykisteen kokonaissiirtymän mitoituksessa. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015d)

### Jäykistävän seinän tukipainekestävyys

Jäykistysseinään kohdistuvat pystykuormat ja vaakakuormat jäykistävän seinän yläreunaan aiheuttaa tukireaktion levyn vastakkaisessa alareunassa, mikäli seinä ei ole ankkuroitu alapuoliseen rakenteeseen. Tukipainekestävyyden mitoituksessa huomioidaan ainoastaan pystysuuntaiset lamellit. Tukireaktion puristetun alueen pituus  $x$  tulee määrittää. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015c)

Jäykistysseinät ankkuroidaan usein estämään suuria tukireaktioita ja jäykistämään rakennetta. Ankkurointi tehdään usein teräsliittimillä ja jäykistysmitoituksessa tulee tarkastaa liitinten kestävydet, jäykistävän seinän palalohkeamismurto- ja lohkeamismurtokestävyydet. Ankkuroiva liitin tulee myös mitoittaa vetokestävyyden ja vaakaleikkauskestävyyden suhteen. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015c)

## 4.5 Rakennuksen jäykistys

CLT-rakenteessa seinäelementit toimivat jäykistävänä rakenteena. Jäykistysseinät mitoitetaan kestäväksi rakenteeseen kohdistuvat kuormat. Kansallisen liitteen NA(FI) mukaan jäykistävän seinän vaakaleikkauskestävyys lasketaan käyttäen kappaleen EN 1995-1-1:9.2.4.2 mukaista menetelmää A jäykistysmitoituksessa. Menetelmän käyttämistä edellyttää, että jäykistävä seinä on ankkuroitu alla olevaan rakenteeseen estäen seinän nousemisen yläreunaan kohdistuvan vaakakuorman takia. CLT-rakenteen jäykistysmitoituksessa tulee mitoittaa jäykistysseinälevynkestävyys. Kun CLT-levy itsessään toimii jäykistävänä levynä, seinien liitokset määrittävät jäykistyskestävyyden ja tulee mitoittaa siten, että ne hoitavat rakennukseen kohdistuvan vaakavoiman ja jäykistävät rakennuksen. Koko seinän vaakaleikkauskestävyys lasketaan summana yksittäisten jäykistysseinälohkojen vaakaleikkauskestävyydestä. Kaavat (4.63...4.64) on otettu kirjasta RIL 205-1-2017. (RIL 205-1-2017, ss. 156-159)

$F_{f,Rd}$	[N]	yksittäisen liitimen leikkauskestävyys
$b_i$	[mm]	seinälohkon leveys
$s$	[mm]	liitinväli

$$c_i = \begin{cases} 1, & \text{kun } b_i \geq \frac{h}{2} \\ \frac{2b_i}{h}, & \text{kun } b_i < \frac{h}{2} \end{cases}$$

Yksittäisen seinälohkon vaakaleikkauskestävyys:

$$F_{i,v,Rd} = \frac{F_{f,Rd} \cdot b_i \cdot c_i}{s} \quad [\text{N}] \quad (4.63)$$

Jäykistävän seinän kokonaisvaakaleikkauskestävyys:

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd} \quad [\text{N}] \quad (4.64)$$

Tarkemmat selitykset ja lisäohjeistukset rakennuksen jäykistysmitoitukseen, liitinten mitoitukseen ja erikoistilanteisiin löytyy RIL 205-1-2017 kappaleesta (9.2.4). (RIL 205-1-2017)

## 4.6 Liitosten mitoituseriaatteen

CLT-rakenteen liitokset suunnitellaan pääosin tyypillisten puurakenneliitosten mukaisesti. Liitokset tulee mitoittaa kestäväksi rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset ja CLT-rakenteessa liitosten päätehtäviin kuuluu myös rakennuksen jäykistys. CLT-liitosten suunnittelussa tulee huomioida rakennusmääräysten vaatimukset. Liitosten mitoituksessa huomioidaan paloturvallisuus ja liitokset tulee olla tiiviitä kosteuden, ilmatiiveyden ja ääneneristävyyden kannalta. (Kevärinmäki, 2017b)

CLT-rakenteiden liitokset voidaan tehdä ruuvi-, teräsosa-, pultti- ja kontaktiliitoksina, kuten esimerkiksi hammastusliitoksena. Tyypillisimmät liitokset tehdään teräsosa- ja ruuviliittimiä käyttäen. Liitosten mitoituksessa tulee huomioida liittimien reunaetäisyydet ja liitinvälit lohkeamisen kannalta. Naula- ja ruuviliitoksissa tulee naulan paksuus olla vähintään 4 mm ja ruuvin vähintään 6 mm. Syrjäliitoksissa on käytettävä ainoastaan itseporautuvia ruuveja 8 mm minimipaksuudella. (Kevärinmäki, 2017a)

Naulaliitoksissa tarkastellaan naulaliitoksen leikkauskestävyys sahatavaraliitoksen mukaisen mitoituksen mukaan. Naulaliitoksen ulosvetokestävyys lasketaan kaavalla: (Kevärinmäki, 2017a)

$$R_k = 14 \cdot d^{0,6} \cdot t_{pen} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.65)$$

Jossa:

$d$	[mm]	naulan halkaisija
$t_{pen}$	[mm]	naulan upotussyvyys

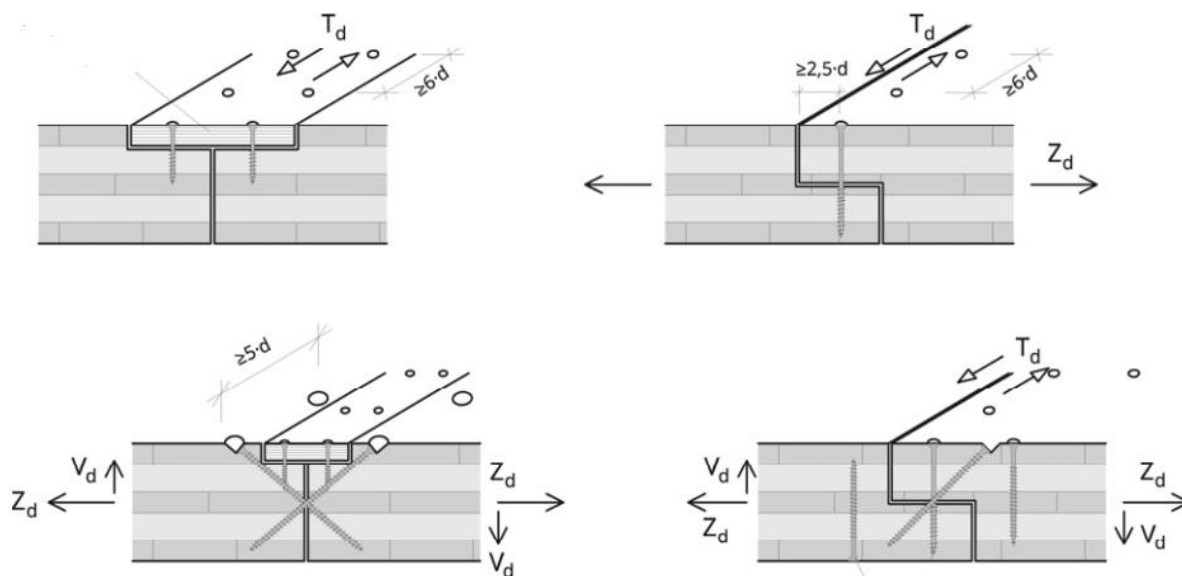


Naulan halkaisija tulee olla vähintään 4 mm ja upotussyvyys tulee olla vähintään  $8 \cdot d$ . (Kevarinmäki, 2017a)

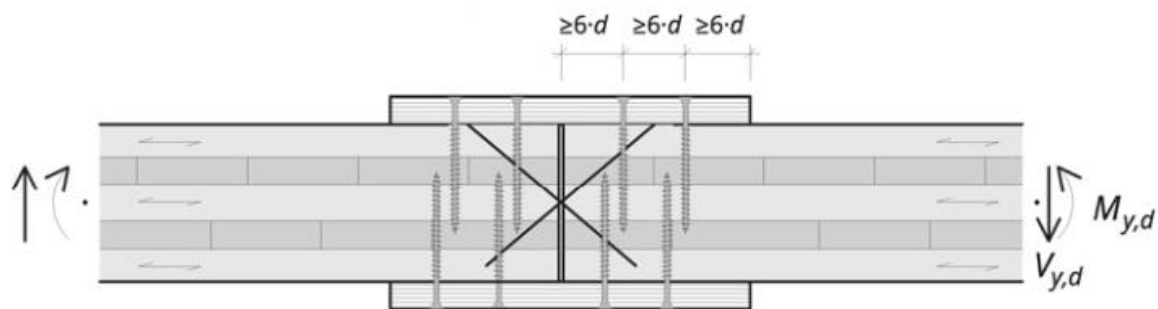
CLT-elementtien liitokset, varsinkin välipohjan ja ylläolevan seinän sauma, tulee eristää tärinäeristeellä runkoäänen ja värähtelyn ehkäisemiseksi. Tärinäeristys on huomioitava liitosdetaljen suunnittelussa ja liitosten mitoituksessa. Tärinäeristys vaimentaa kuormituksen aiheuttamaa värähtelyä joustavan painauman ansiosta. Eristinkaistalle on valmistajan toimesta annettu optimaalinen jännitys, sekä suurin sallittu hetkellinen jännitys, joka ei muuta tärinäeristysominaisuutta. Tärinäeristeet mitoitetaan kestämään kantavien seinien kuormituksen aiheuttamaa rasitusta. (A-insinöörit, 2017)

#### 4.6.1 Ruuviliitokset

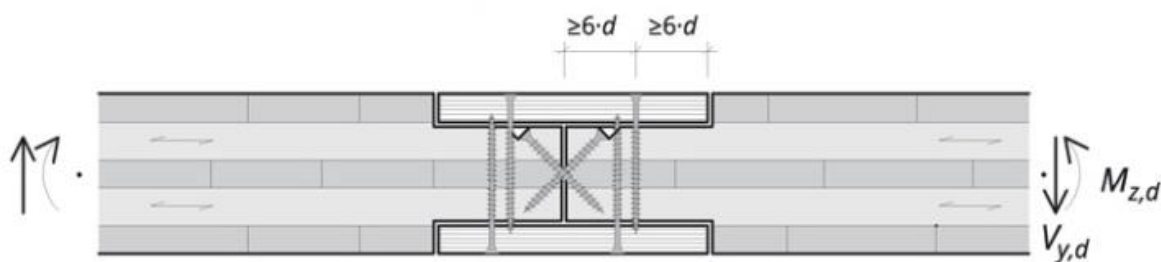
Lappeessa olevaan ruuviliitokseen kohdistuu sauman suuntainen leikkausvoima. Liitoksessa käytettävät ruuvien leikkauskestävyys ja etäisyydet tulee mitoittaa kestämään sauman suuntaista leikkausvoimaa. Jos liitokseen kohdistuu vetovoima, voidaan liitosta vahvistaa risteävillä ruuveilla. Liitokseen kohdistuvia jännityksiä ja ruuviliitosratkaisuja on esitetty kuvassa 9. (proHolz Austrian, 2014, s. 100)



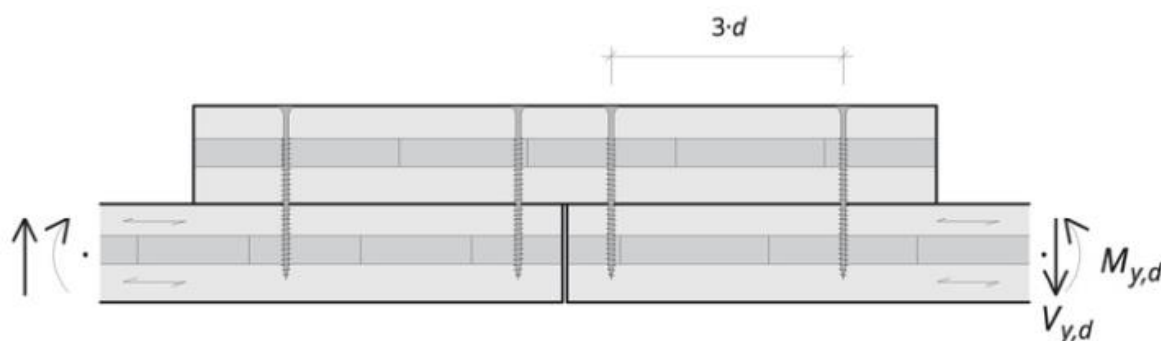
Kuva 9: Ruuviliitosratkaisuja liitoksiin kohdistuvien jännitysten mukaan sekä ruuvien reunaetäisyysvaatimukset. (proHolz Austrian, 2014)



Kuva 10: Jäykkä liitos jännevälisuunnassa. (proHolz Austrian, 2014)

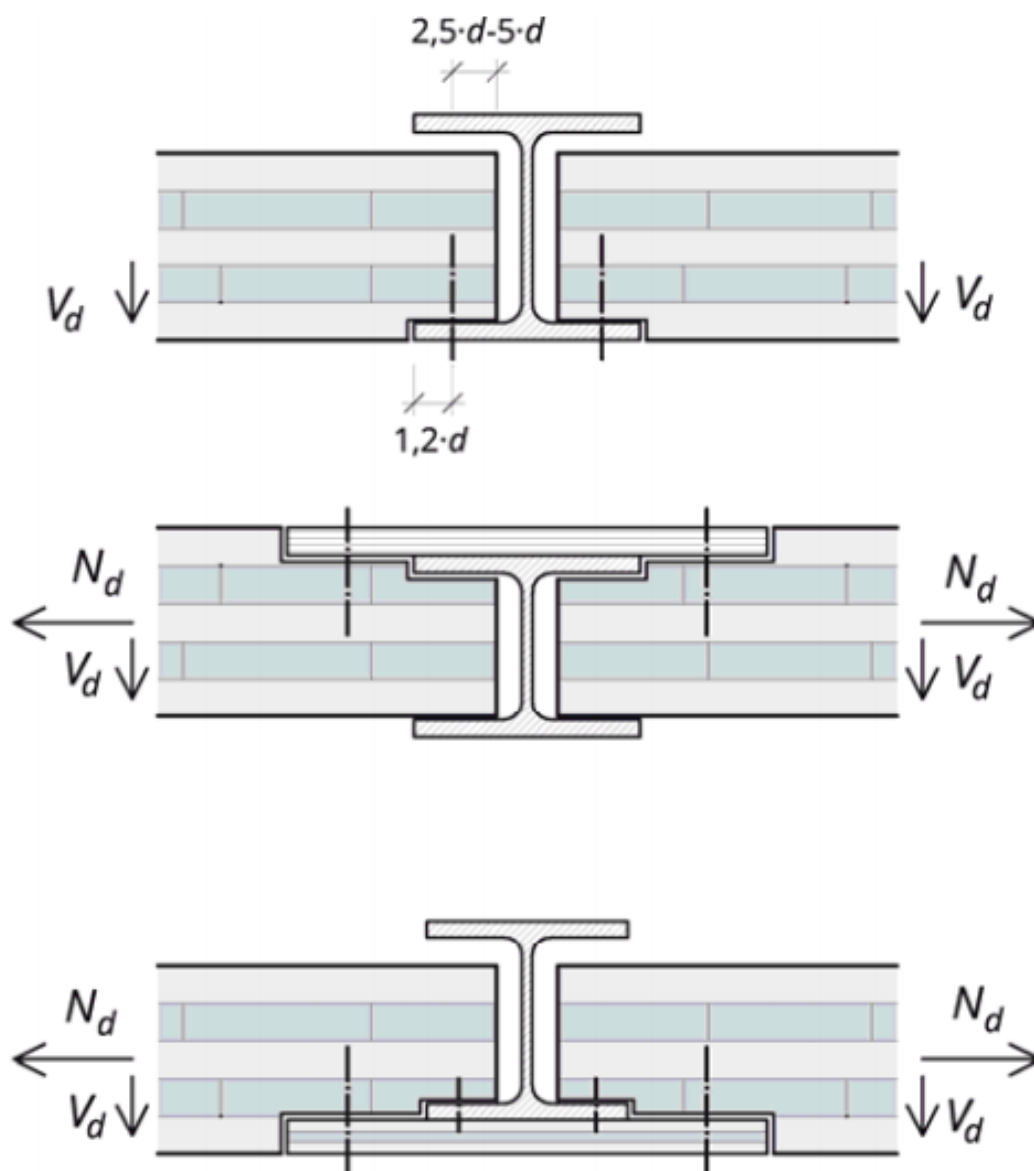


Kuva 11: Jäykkä liitos poikittaissuuntaan. (proHolz Austrian, 2014)



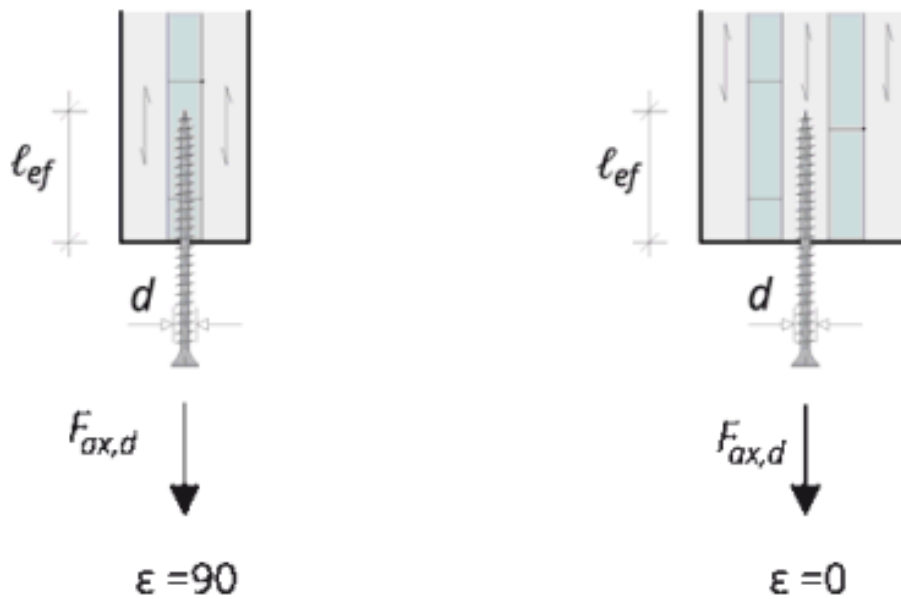
Kuva 12: Jäykkä liitos jännevälisuunnassa, ohuelle CLT-levylle. (proHolz Austrian, 2014)

Kuvissa 10-12 on esitetty momenttijäykkiä ruuviliitoksia vaakarakenteille. Vaakarakenteeseen kohdistuvan pystykuorman aiheuttaessa rakenteessa taivutusmomentin, tulee liitos vahvistaa momenttia siirtävillä jatkoslevyillä. Kuvassa 10 ja 12 on esitetty momenttijäykkä liitos jännevälisuunnassa ja kuvan 11 liitos on momenttijäykkä CLT-levyn poikittaissuunnassa. (proHolz Austrian, 2014, s. 100)



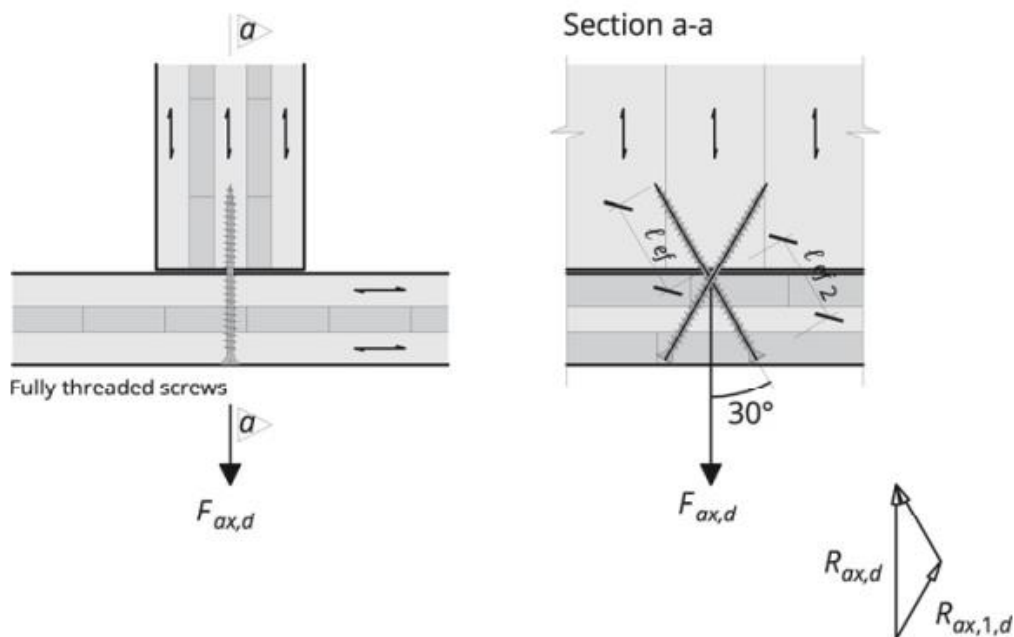
Kuva 13: Upotettu palkkiliitos. (proHolz Austrian, 2014)

Kuvassa 13 on esitetty CLT rakenteeseen upotetun teräspalkin liitosesimerkkejä yhdistelmä rakenteessa. Ruuviliitokseen CLT-levyn syrjään voi kohdistua leikkausvoima sekä ulosvetovoima. Liitoksen ruuvien leikkauskestävyys sekä ulosvetokestävyys tulee mitoittaa. Syrjään ruuvattun liitoksen itseporautuvan ruuvin halkaisija  $d$ , tulee olla vähintään 8 mm ja upotussyvyys  $10 \cdot d$  ja CLT-levyn paksuus tulee olla vähintään  $10 \cdot d$  ja lamellikerroksen paksuus  $3 \cdot d$ . (Kevarinmäki, 2017a)



Kuva 14: Ulosvetovoima ruuviliitoksessa CLT-levyn syrjään. (proHolz Austrian, 2014)

Kuvassa 14 ja 15 on esitetty ruuviliitokset CLT-levyn syrjään 3- ja 5-lamellikerroksiselle levyille. 3-kerroksiseen levyyn ruuvi kiinnitetään poikittaiseen lamellikerrokseen lappeeseen, jolloin ulosvetolujuutena käytetään C24 sahatavaran lapesuuntaista ulosvetolujuutta. 5-kerroksisessa levyssä ruuvi kiinnitetään pystysuuntaiseen lamelliin, jolloin ulosvetolujuutena käytetään C24 syysuuntaista ulosvetolujuutta. (Kevarinmäki, 2017a)



Kuva 15: Ulosvetovoima vinoon ruuviliitokseen, CLT-levyn syrjään. (proHolz Austrian, 2014)

Ruuviliitosten ulosvetokestävyys lasketaan kaavalla: (Kevarinmäki, 2017a)

$$R_{ax,k} = \sum_{i=1}^n f_{ax,i,k} \cdot l_{ef,i} \cdot d \quad [\text{N}] \quad (4.66)$$

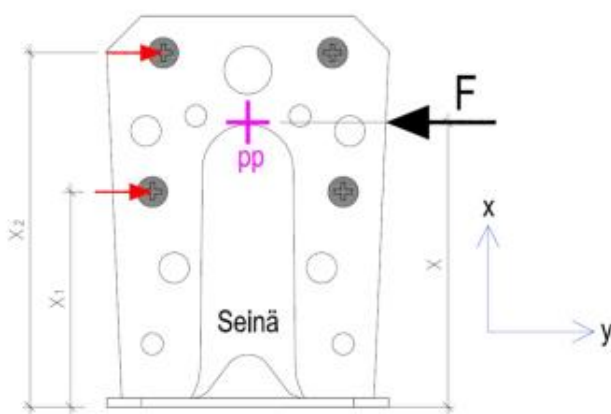
Jossa:

$f_{ax,i,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	C24 sahatavaran ulosvetolujuus kuormitussuunnassa $\alpha$
$l_{ef,i}$	[mm]	kierreosan upotussyvyys, vähintään 4*d

Lapeliitoksissa ruuvien halkaisija  $d$  tulee olla vähintään 6 mm ja syrjäliitoksessa 8mm. Ruuviliitoksessa levyn syrjään on ruuvi liitettävä kokonaiseen lamellikerrokseen. (Kevarinmäki, 2017a)

#### 4.6.2 Kulmalevyliitokset

Kulmalevyliitoksia mitoittaessa lasketaan voimien jakautumista kulmalevyssä, levyn liittämiin. Seinää vasten olevaan laippaan, voima  $F$  kohdistuu oletettavasti liitinryhmän painopisteeseen kuvan 16 mukaisesti, jolloin liitinryhmään ei synny momenttia. Kaavat (4.67...4.73) on otettu Puuinfon Vaativien puurakenteiden koulutusmateriaalista, CLT-levyjien liitoksista. (Kevarinmäki, 2017b)

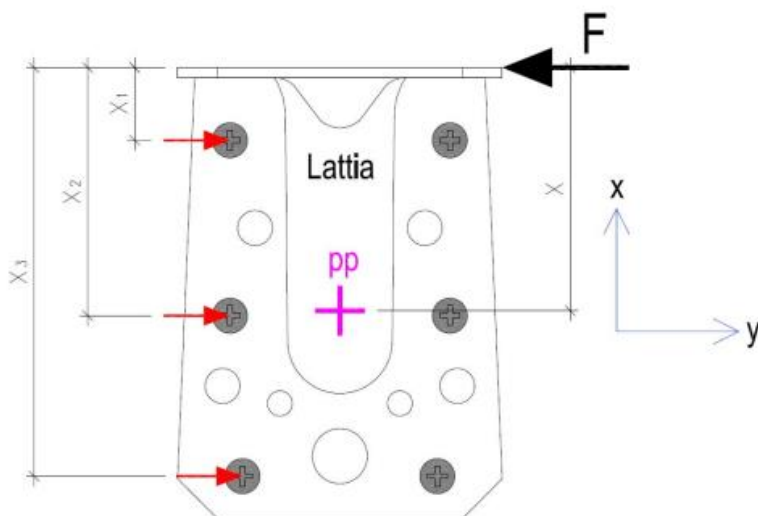


Kuva 16: Seinää vasten olevan kulmalevyyn kohdistuva voima. (Kevarinmäki, 2017b)

Kun voima  $F$  vaikuttaa liitinryhmän painopisteeseen lasketaan yksittäisen liittimen kuormitus jakamalla voima  $F$ , laipan liitinten kokonaismäärällä  $n$  kaavan 4.67 mukaisesti:

$$F_{max} = \frac{F}{n} \quad [\text{N}] \quad (4.67)$$

Lattiaa vasten olevaan laippaan voima  $F$  kohdistuu oletettavasti kulmalevyn taittokohtaan kuvan 17 mukaisesti, jolloin liitinryhmään syntyy momentti.



Kuva 17: Liitinvoiman määrittäminen, Kimmoteoria. (Kevarinmäki, 2017b)

$x$	[mm]	voiman $F$ etäisyys liitinten painopisteeseen
$n_{x,i}$		voimavarsien määrä
$x_i$	[mm]	liittimen etäisyys painopisteeseen $x$ suunnassa
$y_i$	[mm]	liittimen etäisyys painopisteeseen $y$ suunnassa
$x_{max}$	[mm]	liittimen enimmäisetäisyys painopisteestä $x$ suunnassa
$y_{max}$	[mm]	liittimen enimmäisetäisyys painopisteestä $y$ suunnassa
$n$		liittimien kokonaismäärä laippaa kohden

Liitinryhmän painopisteen etäisyys vaikuttavaan voimaan  $F$ :

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_i}{n_{x,i}} \quad [\text{mm}] \quad (4.68)$$

Etäisyyden  $x$  aiheuttama momentti:

$$M = x \cdot F \quad [\text{kN m}] \quad (4.69)$$

Liitinryhmän polaarinen jäyhyysmomentti:

$$I_p = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + y_i^2) \quad [\text{mm}^4] \quad (4.70)$$

Maksimi voima  $F$  suuntiin  $x$  ja  $y$ :

$$F_x = \frac{M \cdot y_{max}}{I_p} \quad (4.71)$$

$$F_y = \frac{F}{n} \cdot \frac{M \cdot x_{max}}{I_p} \quad (4.72)$$

Liitinvoima eniten rasitetussa liittimessä:

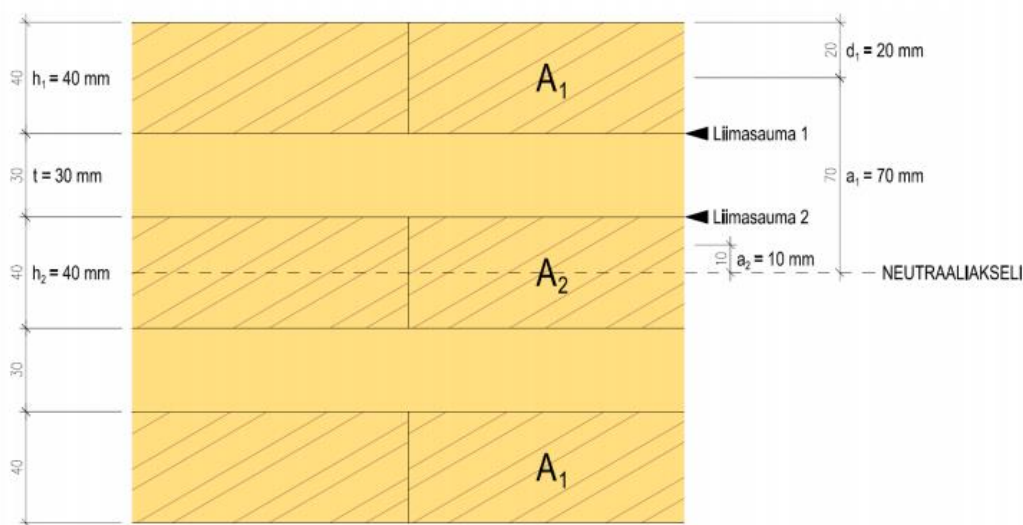
$$F_{max} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad [\text{N}] \quad (4.73)$$

Liitinvoima tulee olla pienempi kuin yksittäisen liittimen lujuus  $R_d$ . (Kevarinmäki, 2017b)

#### 4.7 Välipohjanlevyn mitoitus

Välipohjan kestävydessä tarkastellaan taivutuskestävyyttä, leikkauskestävyyttä, taipumaa ja välipohjan värähtelyä. Välipohja tulee mitoittaa kestäämään kaikki kuormitustapaukset. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

CLT-välipohjan kestävyttä mitoittaessa tarkastellaan poikkileikkauksen jännevälinsuuntaisten lamellien kestävyys. Värähtelymitoituksessa huomioidaan myös poikittaissuuntaiset lamellikerrokset. Tehollisen jäykkyyden mitoitusmenetelmä pätee, kun CLT-levy on enintään viisikerroksinen. Välipohjalevyn poikkileikkauksen teholliset poikkileikkausvakiot määritellään kappaleen (4.3.1) mukaisesti. (Kevarinmäki, 2017a)



Kuva 18: CLT-välipohjalevyn poikkileikkaus. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

Kuvan 18 mukaisen arvot 5-kerroksisen CLT-välipohjalevyn laskennassa: (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

$L$	[mm]	jänneväli
$t$	[mm]	poikittaissuuntaisen lamellin paksuus
$b$	[mm]	tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys (1000mm)
$h_i$	[mm]	lamellin paksuus
$a_i$	[mm]	tehoillisten lamellin painopisteen etäisyys neutraaliakseliin
$d_i = h_i/2$	[mm]	

#### 4.7.1 Välipohjan taivutuskestävyys

Välipohjan taivutuskestävyyden kaavat (4.74...4.76) sovellettu kirjan RIL 205-1-2017 ja Crosslam Kuhmon laskentaohjeistusten mukaan. (RIL 205-1-2017, s. 74; Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

Kuorman aiheuttama momentti:

$$M_{y,d} = \frac{q_d \cdot L^2}{8} \quad [\text{kN m}] \quad (4.74)$$

Taivutusjännitys:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_{ef,L}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.75)$$

Taivutuskestävyys RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella: (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{m,k} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.76)$$

Taivutuskestävyys tulee olla suurempi kuin taivutusjännitys,  $f_{m,d} > \sigma_{m,y,d}$

#### 4.7.2 Leikkauskestävyys neutraaliakselilla sekä liimasaumassa

Olettaen että poikittaissuuntaisen lamellin leikkausjännitys on sama koko lamellille, saadaan sama leikkausjännitys liimaussamoissa 1 ja 2. Tasoleikkausjännitys  $\tau_d$  tulee olla pienempi kuin valmistajan antama, levyn leikkauslujuus  $f_{v,d}$ , ja liimasauman tasoleikkauslujuus  $f_{R,d,0}$ .



Leikkauskestävyys laskettu kirjan RIL 205-1-2017 sekä RIL kirjan CLT-lisäohjeistusten mukaan. (RIL 205-1-2017, ss. 74-76; Kevarinmäki, 2017a)

$f_{v,k}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	lamellin leikkauslujuus, valmistajan tuoteominaisuustaulukosta
$f_{R,k,0}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	liimasauman tasoleikkauslujuus, valmistajan taulukosta

Kuorman aiheuttama leikkausvoima:

$$V_d = \frac{q_d \cdot L}{2} \quad [\text{N}] \quad (4.77)$$

Tasoleikkausjännitys: (Kevarinmäki, 2017a)

$$\tau_d = \frac{V_d \cdot S_{ef,1}}{I_{ef,L} \cdot b} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.78)$$

Lamellin leikkauslujuus RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella: (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.79)$$

Liimasauman tasoleikkauslujuus RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella: (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{R,d,0} = \frac{k_{mod} \cdot f_{R,k,0}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.80)$$

Lamellin leikkauslujuus sekä liimasauman tasoleikkauslujuus tulee olla suuremmat kuin leikkausjännitys  $f_{v,d} > \tau_d$  ja  $f_{R,d,0} > \tau_d$

### 4.7.3 Välipohjan taipuma

Välipohjan taipumalaskennan kaavat (4.81...4.84) kirjan RIL 205-1-2017 ja Crosslam Kuhmon laskentaohjeistusten mukaan. (RIL 205-1-2017, s. 97; Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

$k_{def}$	virumakerroin lapellaan taivutuksessa
$\psi_2$	muuttuvan kuorman pitkäaikaisyhdistelykerroin

Välipohjan omapainosta aiheutuva hetkellinen taipuma:

$$w_{inst,g} = \frac{5}{384} \cdot \frac{g_k \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_{ef,L}} \quad [\text{mm}] \quad (4.81)$$

Välipohjan hyötykuormasta aiheutuva hetkellinen taipuma:

$$w_{inst,q} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_k \cdot L^4}{E_{0,mean} \cdot I_{ef,L}} \quad [\text{mm}] \quad (4.82)$$

Hetkellinen taipuma:

$$\Sigma w_{inst} = w_{inst,g} + w_{inst,q} \quad [\text{mm}] \quad (4.83)$$

Lopullinen taipuma:

$$\Sigma w_{fin} = w_{inst,g} \cdot (1 + k_{def}) + w_{inst,q} \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \quad [\text{mm}] \quad (4.84)$$

Hetkellinen ja lopullinen taipuminen tulee täyttää enimmän sallitun taipuman raja-arvon kansallisen liitteen NA(FI) EN 1995-1-1 mukaan. Pääkannattimille  $w_{inst} < L/400$  ja  $w_{fin} < L/300$ .

#### 4.7.4 Välipohjan tukipainekestävyys

Välipohjaan kohdistuva tukipaine välipohjan ja seinän välisessä liitoksessa on esitetty kuvassa 8, kappaleessa 4.4.5. CLT-välipohjarakenteessa seinärakenteen pystylamellit muodostavat kosketuspinnan välipohjaan. CLT-rakenteiden liitoksissa tehollisen poikkileikkauksen takia syntyy useimmiten kaksi tai kolme kiskopainerasitusta. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

$f_{c,0,k}$	$[\text{N/mm}^2]$	lamellin puristuslujuus
$k_{c,90}$		kuormituksen, halkeamisen ja puristuksen kerroin (CLT=1,25)

Välipohjan tehollinen kosketuspinnan pituus:

$$L_2 = \min (30\text{mm}; L; \frac{L_1}{2}) \quad [\text{mm}]$$

$$L_3 = \min (30\text{mm}; L) \quad [\text{mm}]$$

Seinän tehollinen kosketuspinnan pituus lamellikerrosta 1 ja 2 vasten:

$$L_{c,90,ef1} = L + L_2 \quad [\text{mm}]$$

$$L_{c,90,ef2} = L_2 + L + L_3 \quad [\text{mm}]$$

Tukipainekestävyys lamellikerrokselle 1:

$$N_{d,1} \quad [\text{N}] \quad \text{tukireaktion voima lamellikerros 1 (N<sub>d</sub>/2)}$$

$$b \quad [\text{mm}] \quad \text{tarkasteltavan pinnan leveys (1000 mm)}$$

Tukipaine kerroin:

$$k_{c,\perp,1} = \frac{L_{c,90,ef,1} \cdot k_{c,90}}{L} \quad (4.85)$$

Tehollinen pinta-ala:

$$A_{ef,1} = L \cdot b \quad [\text{mm}^2] \quad (4.86)$$

Puristusjännitys:

$$\sigma_{c,90,d,1} = \frac{N_{d,1}}{A_{ef,1}} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.87)$$

Puristuslujuus RIL 205-1-2017 (2.4.3) kappaleen mukaisella periaatteella: (RIL 205-1-2017, s. 48)

$$f_{c,90,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.88)$$

Tukipainekestävyys kiskopainerasituksessa tulee täyttää seuraava ehto:

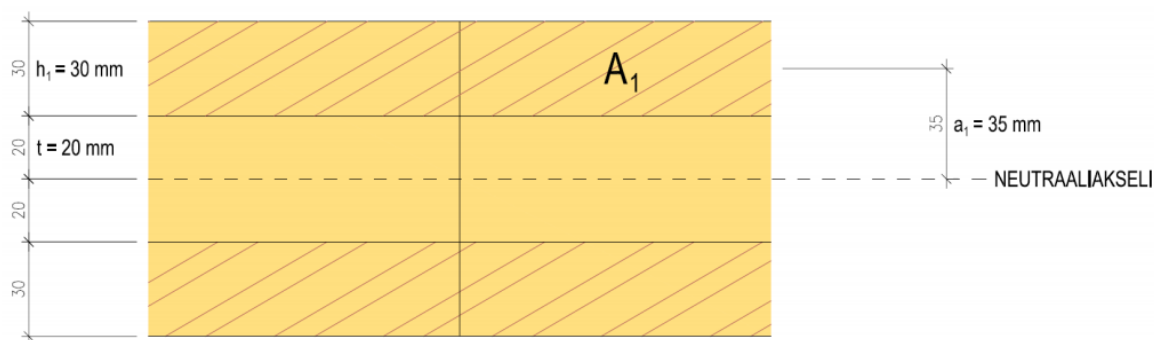
$$\sigma_{c,90,d,1} \leq k_{c,\perp,1} \cdot f_{c,90,d} \quad (4.89)$$

Tukipainekestävyys tehdään myös lamellikerrokselle 2 käyttäen samaa laskelmatapaa. Laskennan kaavat (4.85...4.89), kirjan RIL 205-1-2017 kappaleen 6.1.5 ja Crosslam Kuhmon laskentaohjeistusten mukaan. (RIL 205-1-2017, ss. 72-74; Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

#### 4.7.5 Välipohjan värähtely

Rakenteiden välipohjassa tapahtuva värähtelyn yleisimpinä aiheuttajia ovat kävely, pyykinpesu- ja kodinkoneet sekä liikennetärinä. Kevyet puu- ja teräsvälipohjat on aina mitoitettava värähtelyn kannalta. Suomessa on maailmanlaajuisesti tiukimmat vaatimukset välipohjan värähtelylle. Välipohjalle lasketaan ominaistaajuus, joka määrittelee, onko kyseessä matala- vai korkeataajuuslattia. (Lahtela, 2014)

#### Tehollinen taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa



Kuva 19: CLT-levyn poikittainen poikkileikkaus. (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

Värähtelymitoituksessa huomioon otetaan myös CLT-levyn poikittaissuuntaiset lamellit. Poikkileikkauksen tehollinen taivutusjäykkyys poikittais- sekä jännevälisuunnassa käsikirjan kappaleen (4.3.1) mukaisesti.

Kuvan 19 mukaisen arvot 5-kerroksisen CLT-välipohjalevyn poikittaissuuntaisen tehollisen poikkileikkauksen laskennassa: (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

$L$	[mm]	poikittaisten lamellien pituus (CLT-levyn leveys)
$t$	[mm]	liimasauman etäisyys neutraaliakseliin
$b$	[mm]	tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys (1000mm)
$h_1$	[mm]	poikittaissuuntaisen lamellin paksuus
$a_1$	[mm]	tehoillisten lamellien painopisteen etäisyys neutraaliakseliin

Poikittaissuuntaisen lamellin pinta-ala:

$$A_1 = b \cdot h_1 \quad [\text{mm}^2]$$

Poikittaissuunnan hyötysuhde kerroin kaavasta:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left( \frac{\pi^2 \cdot E_{0,mean} \cdot A_1}{L^2} \cdot \frac{t}{G_{R,mean} \cdot b} \right)} \quad (4.90)$$

Poikittaissuuntaisen lamellin jäyhyysmomentti:

$$I_{y,1} = \frac{b \cdot h_1^3}{12} + \gamma_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 \quad [\text{mm}^4] \quad (4.91)$$

Poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti:

$$I_{ef,B} = 2 \cdot I_{y,1} \quad [\text{mm}^4] \quad (4.92)$$

Tehollinen taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa: (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

$$(EI_{ef})_B = E_{0,mean} \cdot I_{ef,B} \quad [\text{Nmm}^2] \quad (4.93)$$

Tehollinen taivutusjäykkyys jänneväliin suunnassa: (Oy Crosslam Kuhmo Ltd, 2015e)

$$(EI_{ef})_L = E_{0,mean} \cdot I_{ef,L} \quad [\text{Nmm}^2] \quad (4.94)$$

### Välipohjan ominaistaajuus

Ominaistaajuuden kaavat (4.95 ja 4.96) on otettu kirjasta RIL 205-1-2017. (RIL 205-1-2017, s. 230)

$m$  [kg/m<sup>2</sup>] levyn paino neliötä kohden +30kg

Kantava yhteen suuntaan:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI_{ef})_L}{m}} \quad [\text{Hz}] \quad (4.95)$$

Kantava kahteen suuntaan:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI_{ef})_L}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[ 2 \cdot \left( \frac{L}{b} \right)^2 + \left( \frac{L}{b} \right)^4 \right] \cdot \frac{(EI_{ef})_B}{(EI_{ef})_L}} \quad [\text{Hz}] \quad (4.96)$$

Suomessa ei ole mitoitusperiaatteita matalataajuusvälipohjalle, jonka vuoksi kaikki välipohjat mitoitetaan korkeataajuuslattioiksi. Tämä tarkoittaa, että välipohjan ominaistaajuus tulee mitoittaa yli 9 Hz, joka tehdään massan lisäyksellä. Välipohjasta tulee

silloin erittäin massiivinen koska puu on suhteellisen kevyt materiaali, betoniin nähden. Tämä ei ole rakennusteknillisesti tai taloudueellisesti järkevää. (Lahtela, 2014)

### Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma

Ominaistaajuuden lisäksi värähtelymitoituksessa tarkastetaan 1 kN pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma. Pistekuorman aiheuttaman taipuman laskenta RIL 205-1-2017 mukaan. (RIL 205-1-2017, ss. 229-231)

$F$  [kN] tarkasteltava pistekuorma, 1 kN

$L$  [mm] levyn jänneväli

$B$  [mm] levyn leveys

$$k_s = \min \left\{ \sqrt[4]{\frac{(EI_{ef})_B}{(EI_{ef})_L}}, \frac{B}{L} \right.$$

Kahteen suuntaan kantavalle välipohjalevyille ei tarvitse rajoittaa kerrointa  $k_s \leq B/L$ .

Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma: (RIL 205-1-2017, s. 231)

$$\delta = \min \left\{ \frac{F \cdot L^2}{42 \cdot k_s \cdot (EI_{ef})_L}, \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot b \cdot (EI_{ef})_L} \right. \quad [\text{mm}] \quad (4.97)$$

Hetkellinen taipuma tulee täyttää vaatimus  $\delta \leq 0,5$  mm.

Liite 1 sisältää laskentaesimerkin 5-kerroksisen CLT-välipohjalevyn värähtelymitoituksesta. Laskentaesimerkin mukaan voidaan tehdä laskentakokeiluja, värähtelymitoitukseen vaikuttavien tekijöiden määrittämiseksi.

## 5 Rakenteelliset yksityiskohdat ja liitokset

Tämä kappale sisältää CLT-rakennuksissa oleelliset ja tavallisimmat liitostyypit, liitosdetaljien suunnittelussa huomioitavat asiat ja tavanomaisia rakenneratkaisuja CLT-liitoksissa. Liitosdetaljit toimivat usein hyvinä suuntaa antavina malleina rakennesuunnittelussa rakenneratkaisuiden valinnassa. CLT-rakenteiden kannalta yleiset liitosdetaljikokoelmat eivät ole kovinkaan kattavia, mutta kokoelmien esimerkillisiä liitosdetaljeja voidaan soveltaa vastaamaan rakennuskohteen käyttötarkoituksen tarpeita ja rakennusmääräysten vaatimuksia. Liitosdetaljit sisältävät suuntaa antavia periaatteita, joita voi soveltaa rakennuskohteittain ja olla siten avuksi.

Rakennetyypit ja liitokset tulee aina suunnitella vastaamaan kohteen käyttötarkoitusta, erikoistilanteita ja mitoitus. Liitosdetaljit ja rakennetyypit tulee suunnitella vastaamaan Suomen rakennusmääräyksiä sekä rakennusfysikaalisten ominaisuuksien kannalta. Liitosdetaljit suunnitellaan arkkitehtisuunnitteluun pohjautuen ja tulee sovittaa vastaamaan arkkitehtisuunnittelun tilanvarausta. Liitosdetaljisuunnittelussa tulee myös huomioida kuormituksen siirtoreitit, kiinnityisperiaatteet, saumatiivistykset ja elementtien reunamuodot. Liitosdetaljien pohjalta rakennesuunnittelija pystyy tekemään rakenteen lujuus-, jäykistys- ja elementtimitoitukset. Rakennesuunnittelijan näkökulmasta tärkeää on että lujuus- ja palomitoitus huomioidaan liitosten suunnittelussa alusta lähtien. (Stora Enso, 2015)

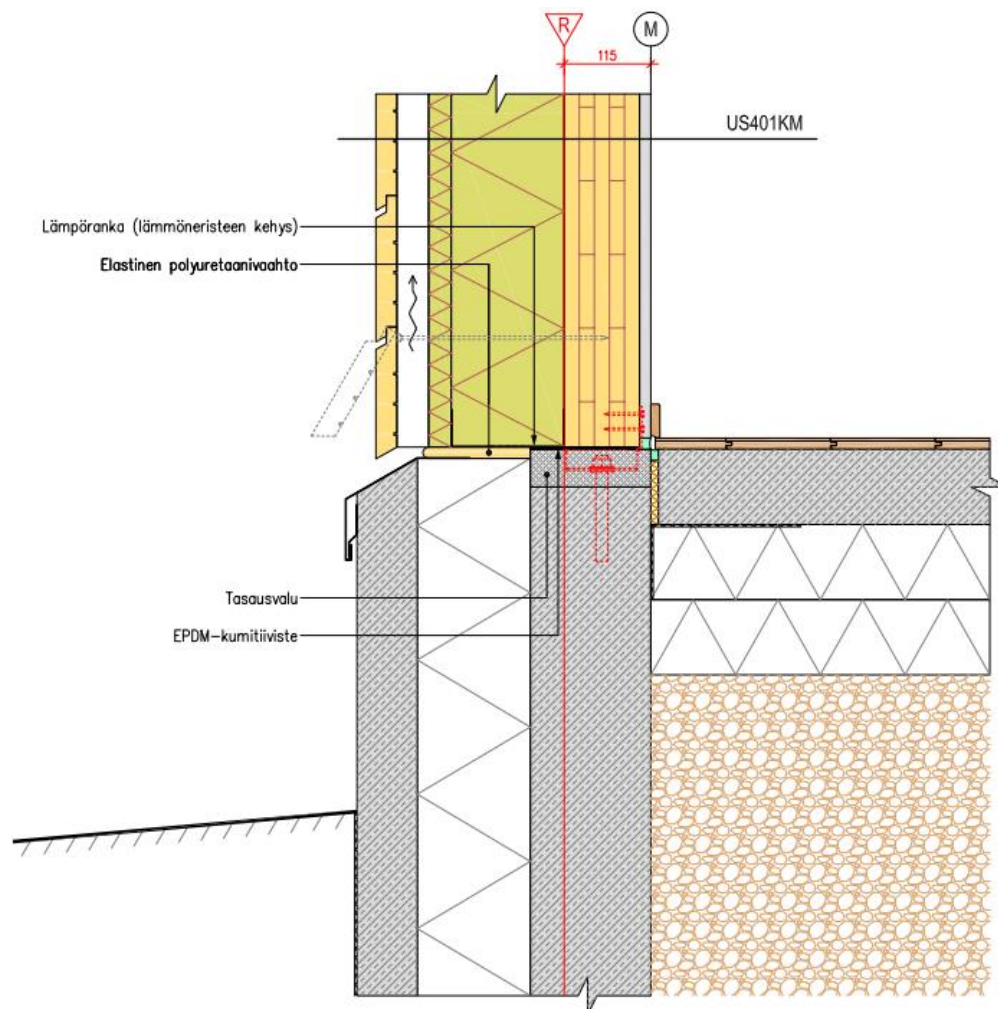
RunkoPES on puuelementtistandardi, jota voidaan käyttää niin pientaloihin kuin kerrostaloihin. Aineisto on sovellettu asuntotuotantoon, mutta voidaan soveltaa rakennusmääräyksiä noudattaen myös toimistokerrostalojen suunnitteluun. RunkoPES-aineistosta löytyy Finnish Wood Researchin puuelementtisen tutkimusohjelmaan perustuva aineisto, joka sisältää tavanomaisia esimerkkejä rakennetyypeistä ja liitosdetaljeista. RunkoPES:in liitosdetalji- ja rakennetyypikirjasto on laadittu P2-paloluokan asuinkerrostaloon. Aineistojen tarkoituksena on ohjeistaa rakennesuunnittelijaa esimerkinomaisesti, mutta detaljit ja rakennetyypit tulee suunnitella Suomen rakennemääräysten mukaisesti kohteesta riippuen. (RunkoPES 2.0, 2013)

Kantavan rakenteen koostuessa kokonaisista CLT-levyistä, voidaan rakenteen liitokset tehdä suhteellisen yksinkertaisesti. Tämän takia rakennesuunnitteluun tarvittavaa aikaa säästyy, kun tarvittavien liitosdetaljien määrä ei ole kovinkaan suuri. CLT-levy voidaan

monipuolisesti yhdistää betoni- ja teräsrakenteisiin, sekä pilari- palkkirakenteisiin. (Pontti Puutuotekeskus, 2012)

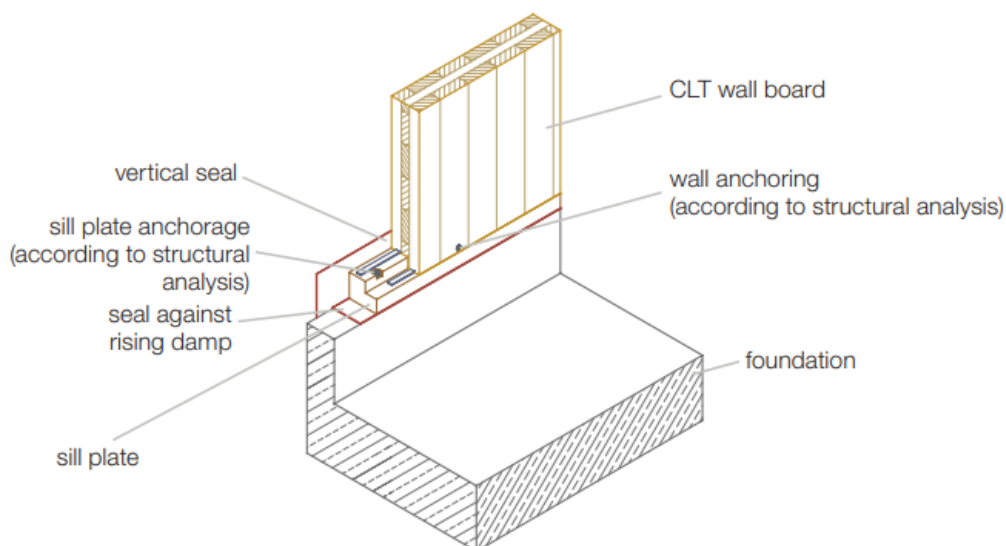
## 5.1 Sokkeliliitokset

Sokkeliliitoksissa CLT-runkolevy kiinnitetään alla olevaan sokkelirakenteeseen käyttäen teräskiinnittimiä, tai vaihtoehtoisesti ruuviliitoksella alaohjauspuuhun, joka on ankkuroitu sokkelirakenteeseen. Sokkeliliitoksissa tulee mitoittaa rakenteen lujuustekniset ominaisuudet, rakenteen jäykistys ja liitoskiinnitykskestävyydet. CLT-levy voidaan kiinnittää suoraan sokkelirakenteen päälle ilman alaohjauspuuta, käyttämällä tasausvalua. CLT-levy tulee suojata betoniperustuksesta nousevalta kapillaarikosteudelta kumitiivisteellä. Alaohjauspuukiinnitystä käyttäessä tulee myös alaohjauspuun ja CLT-levyn sauma tiivistää tiivistenauhalla, jotta sauma saadaan tiiviiksi ilmavirtausten estämiseksi. Kuvissa 20 ja 21 on esitetty esimerkinomaisesti teräsosa- ja alaohjauspuuliitokset sekä liitoksen tiivistysperiaatteet. (Stora Enso, 2015)



*Kuva 20. Sokkeli-seinäliitos teräsosakiinnittimellä. Liitos tehdään ilmatiiviiksi kumitiivisteellä sekä suojataan kosteudelta höyrynsulkuteipillä. (RunkoPES 2.0, 2013)*

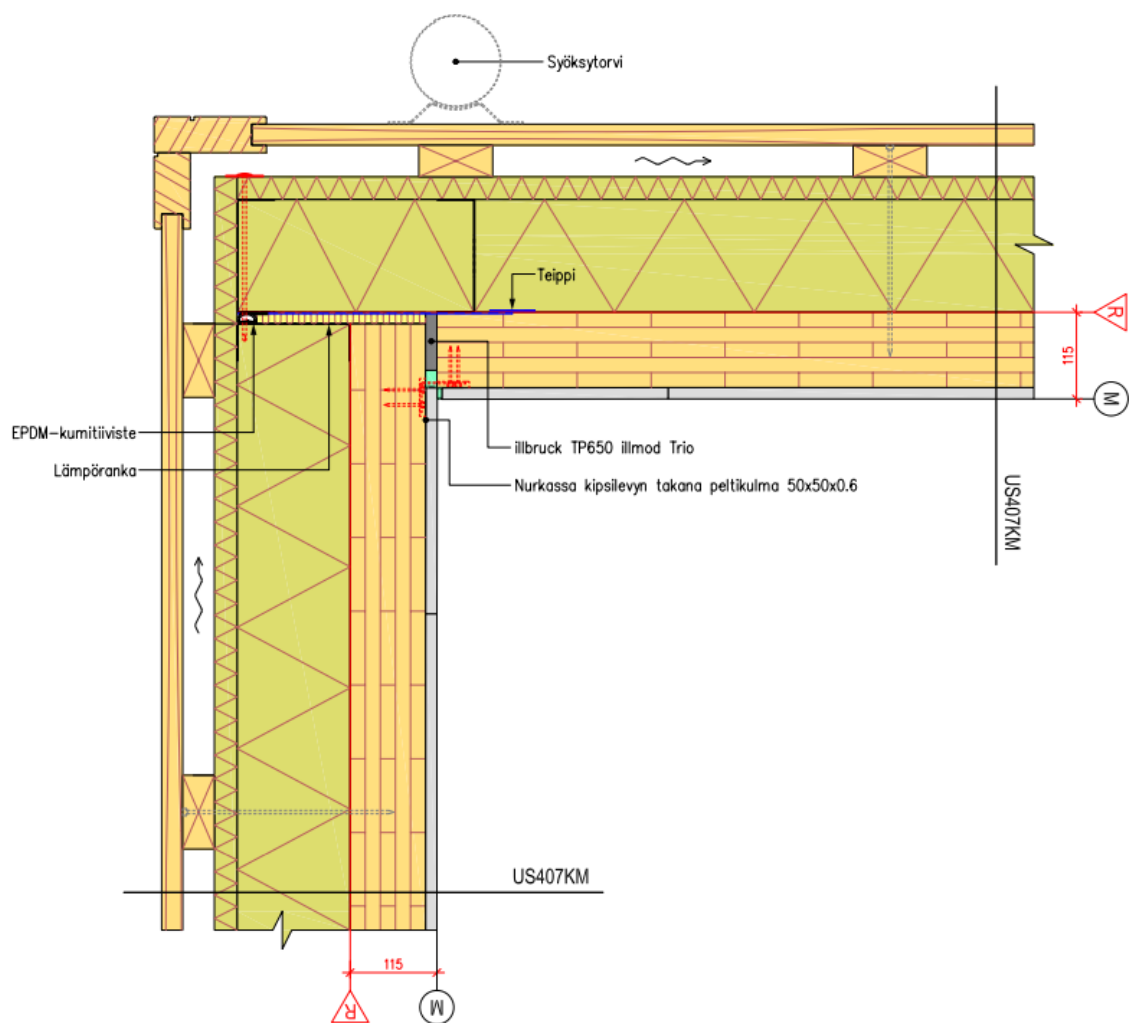




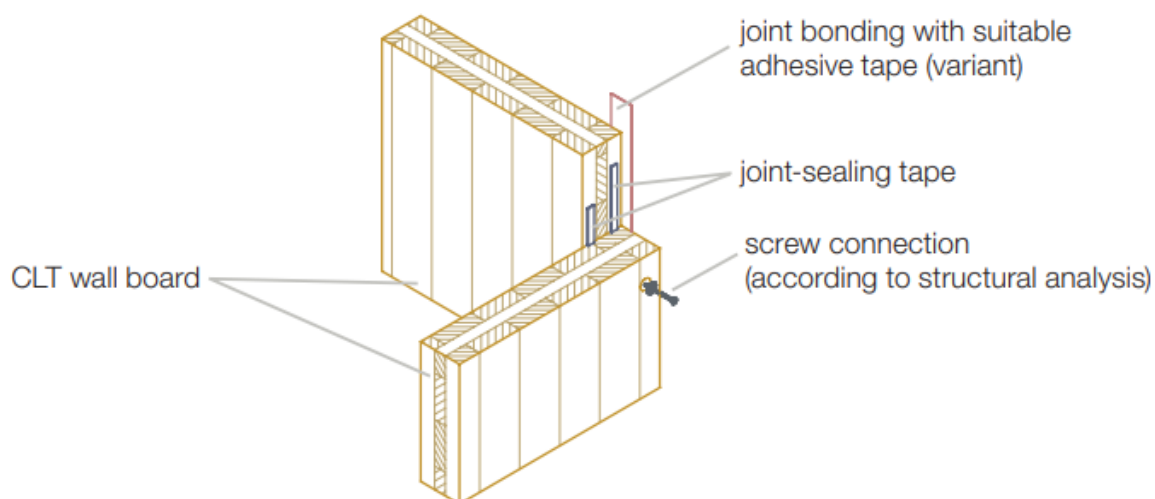
*Kuva 21: Sokkelin ja seinän puoliponttiliitos alaohjauspuulla. CLT toimii höyrynsulkuna mutta liitokset tulee suojata höyrynsulkuteipillä. (Stora Enso, 2015)*

## 5.2 Seinäliitokset

Rakennuksen kantavan rungon CLT-elementtiseinät suositellaan tehtävän koko kerrosten korkeuden korkeista levyistä, ilman vaakaliitoksia kerroksissa. CLT-seinälevyliitoksessa levyt voidaan liittää käyttäen ruuviliitosta tai teräskiinnittimiä. Seinäliitoksessa tulee seinien lujuustekniset ominaisuudet sekä rakenteen jäykistys- ja liitinkiinnityskestävydet mitoittaa. CLT-levy toimii rakenteen höyrynsulkuna mutta seinäliitos tulee olla suojattu kosteudelta höyrynsulkuteipillä. CLT-seinälevyt tulee tiivistää tiivistysnauhalla, jotta ilma ei pääse virtaamaan liitoksen läpi. Kuvissa 22 ja 23 on esitetty seinien liitosten sauman ilma- ja höyrynsulkutiivistys. (Stora Enso, 2015)



Kuva 22. Seinäliitos teräskiinnittimillä. CLT toimii rakenteen höyrynsulkuna mutta liitos suojataan höyrynsulkuteipillä kuvan mukaisesti. (RunkoPES 2.0, 2013)

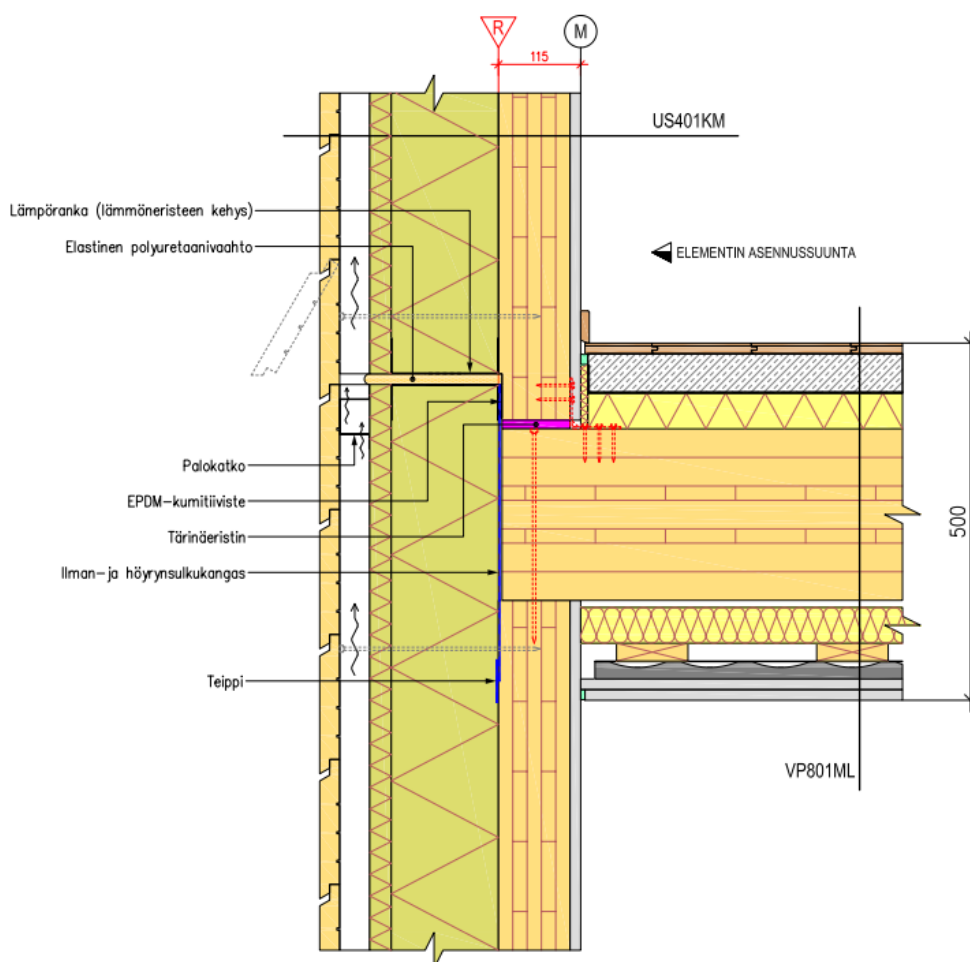


Kuva 23: Seinäliitos ruuvikiinnityksellä. (Stora Enso, 2015)

### 5.3 Välipohja- seinäliitokset

CLT-runkoisen rakennuksen seinä-välipohjaliitoksessa voidaan käyttää ruuviliitosta ja teräskiinnittimiä. Tavanomaista on, että alapuolinen seinä liitetään ruuviliitoksella välipohjaan ja yläpuolinen seinä liitetään välipohjaan kulmateräslittimillä. Välipohja voidaan jossain tapauksissa kiinnittää seinään lappeeseen, jolloin välipohjan kantaa seinään kiinnitettävä teräskannatin tai konsolipalkki. Seinä-välipohja liitoksissa tulee rakenne mitoittaa huomioiden lujustechniset ominaisuudet sekä rakennuksen jäykistys ja liitinkestävyys. (Stora Enso, 2015)

CLT-levy toimii höyrinsulkuna mutta seinän ja välipohjan välinen liitos tulee suojata kosteudelta höyrinsulkuteipillä. Levyjen saumat tulee tiivistää tiivistenauhalla, jotta liitos saadaan tiiviiksi ilmavirtausten estämiseksi. Yläpuolisen seinän ja välipohjan liitoksessa tulee olla tärinäneriste, välipohjan värähtelyn aiheuttaman tärinän eristämiseksi kerrosten välillä. Kuvassa 24 on esitetty esimerkin omaisesti seinä-välipohjaliitos. (Stora Enso, 2015; RunkoPES 2.0, 2013)



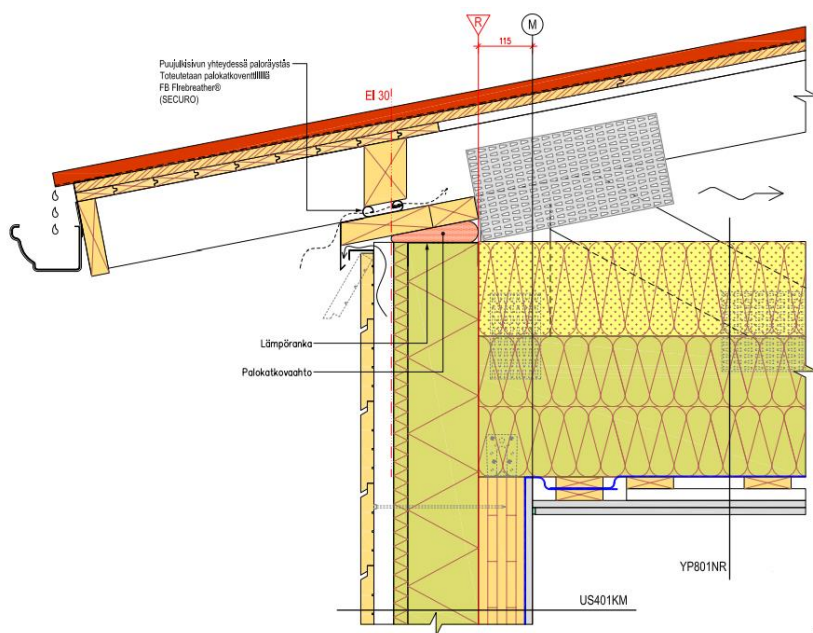
Kuva 24. Välipohja-seinäliitos. Yläpuolisen seinä- ja välipohjalevyn väli tulee eristää tärinäneristeellä. Liitos tulee suojata höyrinsululla. (RunkoPES 2.0, 2013)

## 5.4 Vesikatto-seinäliitos

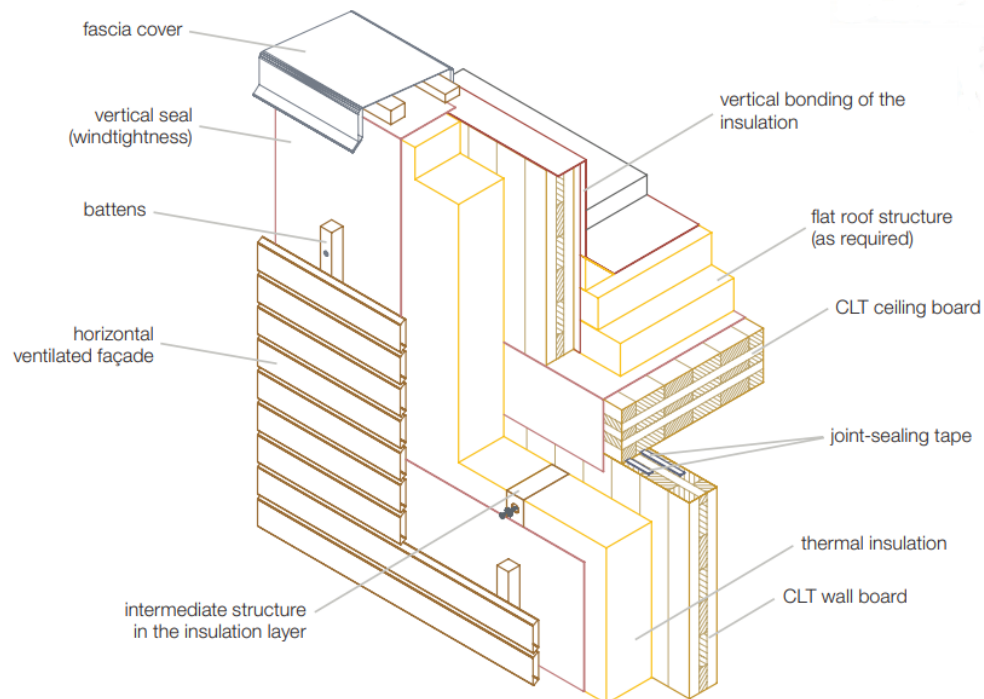
Vesikatto-seinäliitoksen rakenneratkaisu riippuu vesikatto- ja seinärakenteesta. Seinärakenne koostuu yleensä kantavasta CLT-elementtiseinästä. CLT-levyn yläpohjarunkoisen tasakaton liitoksessa seinään noudatetaan samaa periaatetta kuin välipohja-seinäliitoksissa. Yläpohjalevy kiinnitetään tavanomaisesti ruuviliitoksella tai vaihtoehtoisesti teräskiinnittimillä seinäelementtiin. Tasakaton rakennetyyppi tulee suunnitella rakennusmääräysten vaatimuksia noudattaen. CLT-yläpohjalevy voidaan suojata höyrynsulkumuovilla suojaamaan rakennetta kosteudelta ja höyrynsulku tulee viedä liitoksen yli ja teipata. Seinä- ja yläpohjalevyn sauma tiivistää tiivistenauhalla. Kuvassa 26 on esitetty esimerkki CLT-rakenteisen tasakaton liitoksesta seinään. (Stora Enso, 2015)

Kaltevan CLT-yläpohjalevyrunkoisen liitos seinärakenteeseen tehdään yleensä ruuviliitoksella kuvan 27 mukaisesti, tai vaihtoehtoisesti teräskiinnittimillä. Mikäli yläpohjalevy jatkuu seinän yli esimerkiksi räystäänä, voidaan CLT-seinälevyn yläreunaan tehdä viiste, katon kaltevuuden mukaan. Vaihtoehtoisesti seinälevyn reuna voi olla suora ja yläpohjalevyyn tehdään uritus, jolloin mittatarkkuus on hyvin tärkeää. (Stora Enso, 2015)

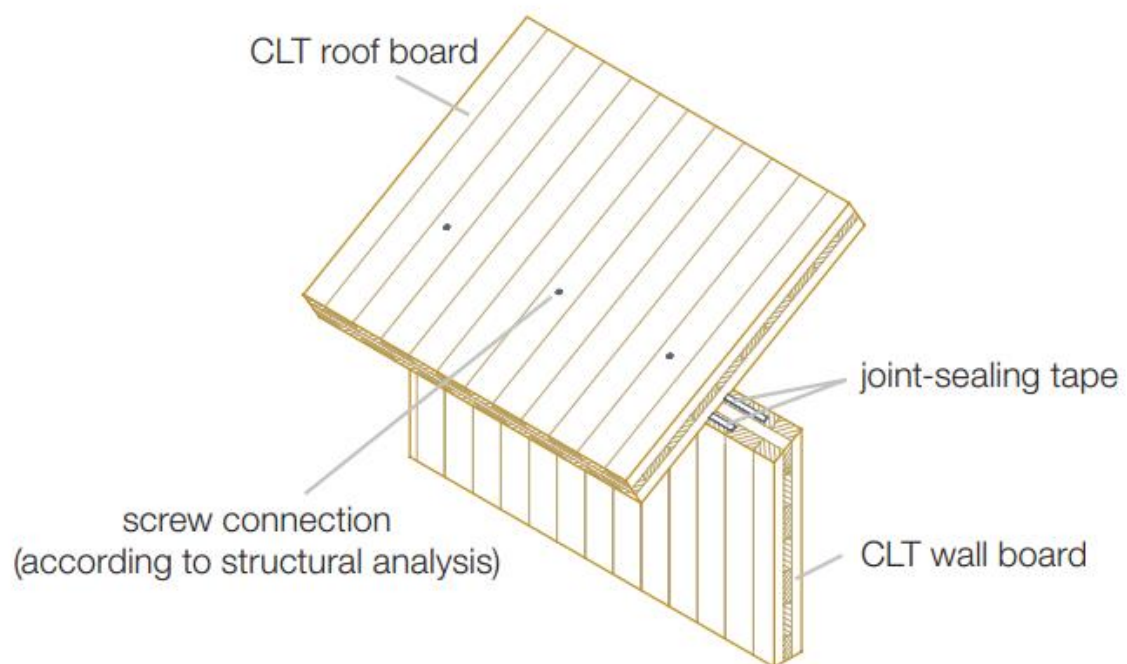
Jos vesikatto koostuu kattoristikosta kuten kuvassa 25, liitetään kattoristikot CLT-seinäelementtiin kulmalevyliittimillä. Kattorakenne tehdään tavanomaisesti kattoristikkorakenteiden mukaisesti. Katon höyrynsulku tulee viedä riittävästi seinälevylle ja teipata. (RunkoPES 2.0, 2013)



Kuva 25: Ristikkokatto- seinäliitos. Kattorakenteen höyrynsulku tulee viedä seinälle. (RunkoPES 2.0, 2013)



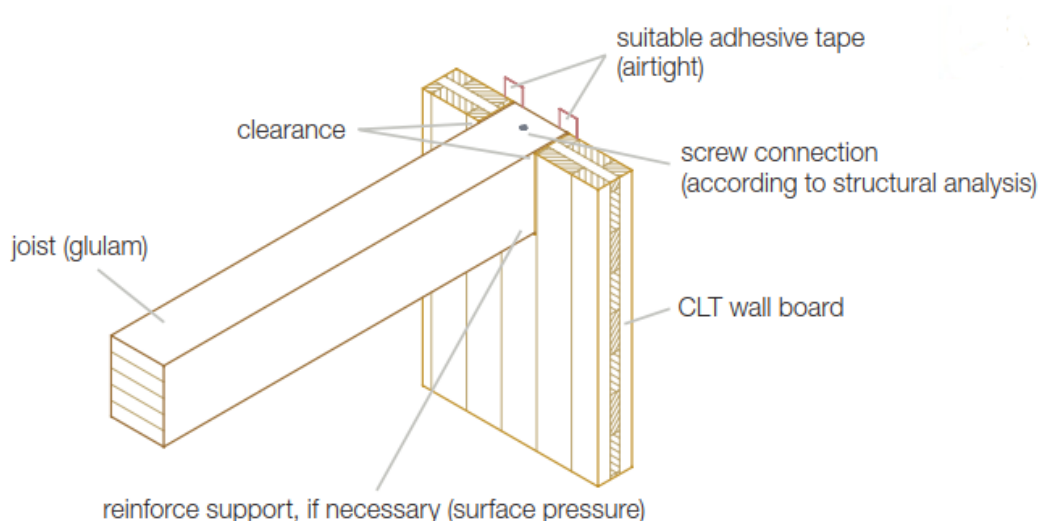
Kuva 26: Tasakatto-seinäliitos. (Stora Enso, 2015)



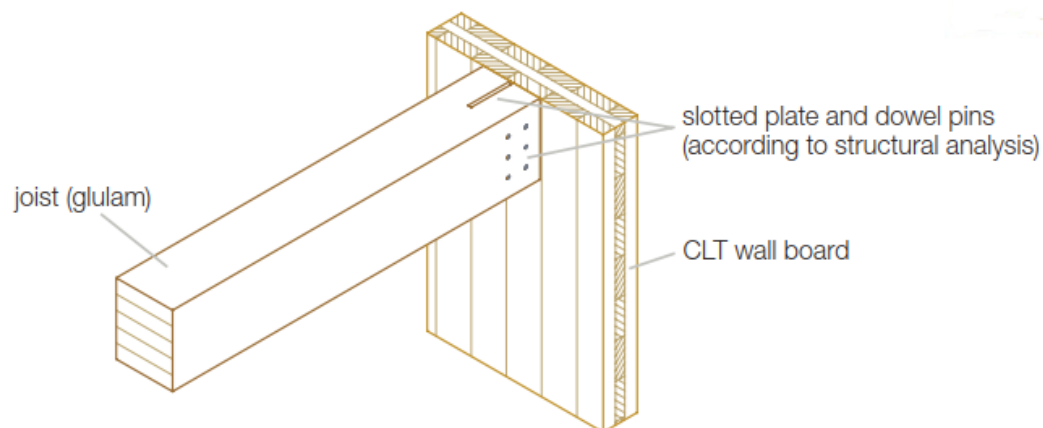
Kuva 27: Kalteva CLT-yläpohja-seinäliittymä, (seinälevyn yläreuna viistetty). (Stora Enso, 2015)

## 5.5 CLT-seinälevyn palkkiliitos

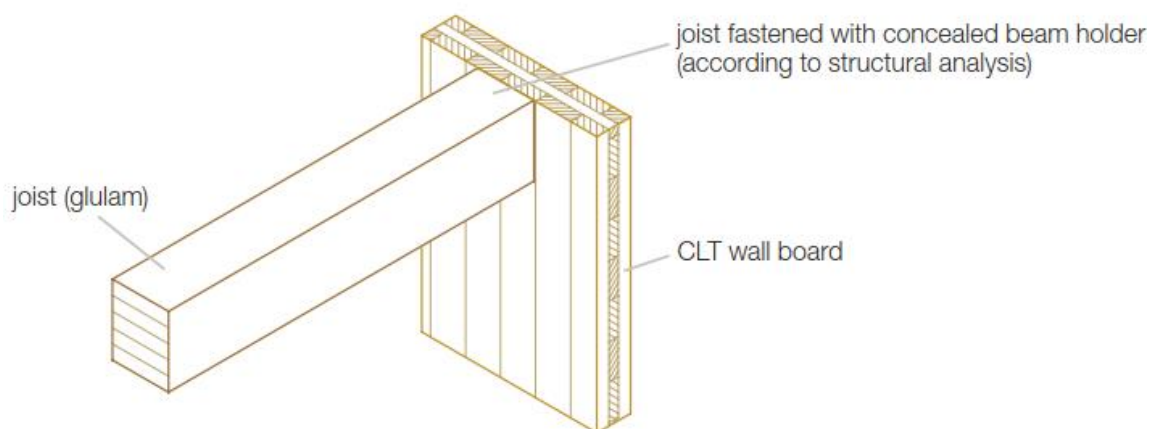
Palkki- ja pilariliitokset CLT-rakenteiseen seinään voidaan tehdä monella tapaa. Liitosratkaisu määrittyy usein rakenteen mitoituksesta ja käyttötarkoituksesta. Massiivipuupalkin liitos CLT-rakenteeseen voidaan tehdä joko kantavan seinäelementin lape- tai syrjäliitoksella. Syrjäliitoksessa palkki makaa seinärakenteen päällä, joka tarkoittaa että liitoksen liitimeen ei kohdistu suuria voimia. Syrjäliitos tehdään usein seinään tehdyllä kolotuksella, johon palkki sijoitetaan kuvan 28 mukaisesti. Upotetun palkin liitos tulee tiivistää, ja tarvittaessa seinän kolotus voidaan vahvistaa. Lapeliitoksessa rakenteeseen ei synny saumaa, joten liitos on tiivis CLT-levyn ominaisuuksien ansiosta. Palkki voidaan liittää kantavaan seinärakenteeseen käyttäen teräслиitintä kuvien 29 ja 30 mukaan. Palkin lapeliitoksessa liitoksen liittimeen kohdistuu suurempi voima, joka tulee huomioida liittimen kestävyysmitoituksessa. (Stora Enso, 2015; FPInnovations, 2019)



Kuva 28: Liimapuupalkin syrjäliitos CLT-seinärakenteeseen. (Stora Enso, 2015)



*Kuva 29: Liimapuupalkin liitos CLT-seinärakenteeseen. Liitoksessa käytetään palkkiin upotettua T-teräslevyliitintä. (Stora Enso, 2015)*



*Kuva 30: Liimapuupalkin lapeliitos CLT-seinärakenteeseen. Liitoksessa käytetään palkkiin upotettua teräsliitintä.*

## Lähdeluettelo

A-insinöörit. (2017). Puurakennusten akustiikkasuunnittelu. *Puuinfo: Vaativien puurakenteiden koulutus 2017* (ss. 1 - 121). Puuinfo.

FPinnovations. (2019). Canadian CLT Handbook 2019 Edition. Pointe-Claire, Quebec, Kanada.

Kevarinmäki, A. (2017a). *RIL 205-1-2017 CLT lisäohjeet: Crosslam Kuhmo CLT*. [Online]  
<https://docplayer.fi/70811987-Ril-lisaohjeet-crosslam-kuhmo-clt.html>  
 [Haettu 12.4.2020]

Kevarinmäki, A. (2017b). CLT levyjen väliset ruuviliitokset ja tärinäneristimen vaikutus. *Puuinfo: Vaativien puurakenteiden koulutus 2017*. VTT Expert Services Oy.

Lahtela, T. (2014). Lattiat-Värähtelymitoitus. *TuplaA-koulutus 2014*. Puuinfo Oy.

Lahtela, T. (2017). CLT- ja LVL-rakentaminen. *Vaativien puurakenteiden suunnittelu - koulutus 2017*. Puuinfo.

Oy Crosslam Kuhmo Ltd. (10. Maaliskuu 2015a). *Seinän nurjahduskestävyys*.  
<https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/mitoituslaskelmat-1-seinn-cc-83n-nurjahduskestn-cc-83vyys.pdf>  
 [Haettu 26.3.2020]

Oy Crosslam Kuhmo Ltd. (10. Maaliskuu 2015b). *Aukkopalkin kestävyys*.  
<https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/mitoituslaskelmat-3-aukkopalkin-kestn-cc-83vyys.pdf>  
 [Haettu 26.3.2020]

Oy Crosslam Kuhmo Ltd. (10. Maaliskuu 2015c). *Tukipainekestävyys*.  
<https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/mitoituslaskelmat-5-tukipainekestn-cc-83vyys.pdf>  
 [Haettu 28.3.2020]

Oy Crosslam Kuhmo Ltd. (10. Maaliskuu 2015d). *Jäykistävän seinän kestävyys*.  
<https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/mitoituslaskelmat-2-jn-cc-83ykistn-cc-83vn-cc-83n-seinn-cc-83n-kestn-cc-83vyys.pdf>  
 [Haettu 28.3.2020]

Oy Crosslam Kuhmo Ltd. (10. Maaliskuu 2015e). *Välipohjan kestävyys*.  
<https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/mitoituslaskelmat-4-vn-cc-83lipohjan-kestn-cc-83vyys.pdf>  
 [Haettu 30.3.2020]

Oy Crosslam Kuhmo Ltd. (2019). *Crosslam*. [Online]  
<https://www.crosslam.fi/tuotteet/tekniset-tiedot.html>  
 [Haettu 4.4.2020]

Oy Crosslam Kuhmo Ltd. *CLT-suunnittelun ohje*.  
<https://www.crosslam.fi/media/ladattavat-pdf/clt-suunnittelun-ohje.pdf>



[Haettu 6.4.2020]

Pontti Puutuotekeskus. (12.2.2012). CLT-rakenteet suunnittelun näkökulmasta. Pontti Puutuotekeskus.

proHolz Austrian. (2014). *proHolz - Cross-Laminated Timber Structural Design*.

<http://www.clt.info/fi/media-ladattavat/esitteet/rakentamisen-ratkaisut/>

[Haettu 1.4.2020]

Puuinfo Oy - Paloturvallinen puutalo. (Helmikuu 2018). *Paloturvallinen puutalo - Asuin- ja toimitilarakentaminen (Palokirja)*.

<https://www.puuinfo.fi/paloturvallinen-puutalo-asuin-ja-toimitilarakentaminen>

[Haettu 24.4.2020]

Puuinfo Oy. (2020). *Insinööripuutuotteet*. Monikerroslevy (CLT): [Online]

<https://www.puuinfo.fi/puutieto/insinooripuutuotteet/monikerroslevy>

[Haettu 1.5.2020]

RIL 205-1-2017. (2017). *Puurakenteiden suunnitteluohje eurokoodi EN 1995-1-1*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

RunkoPES 2.0. (2013). *Finnish Wood Research*. [Online]

<https://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkopes-20>

[Haettu 17.4.2020]

Stora Enso . (2014). *Stora Enso CLT*.

<https://www.puuinfo.fi/sites/default/files/CLT%20image%20brochure%20FI.pdf>

[Haettu 27.4.2020]

Stora Enso. (2015). *Stora Enso Wood Products - Building Solutions*. Technical folder CLT – EN

<http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Technical-folder-CLT-EN.pdf>

[Haettu 14.4.2020]

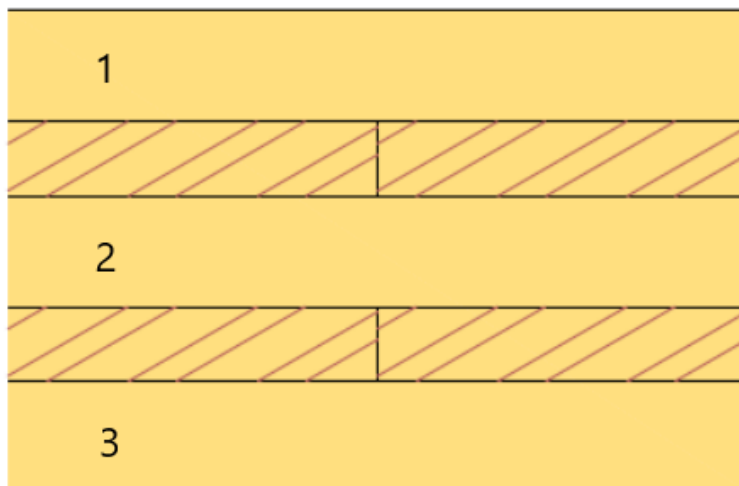
Ympäristöministeriö. (28. Marraskuu 2017). *848/2017*. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen paloturvallisuudesta

<file:///C:/Users/OMISTAJA/Downloads/Asetus%20rakennusten%20paloturvallisuudesta%20FI%20direktiiviviite.pdf>

[Haettu 17.5.2020]

## Liite 1 CLT-välipohjan värähtelymitoituksen laskentaesimerkki

Tarkastellaan CLT-rakenteisen välipohjalaatan värähtelyä. Tarkasteltavan levyn jännevälipituus on 4,4 m. Tarkastellaan 130 mm paksua viisikerroksista Crosslam Kuhmon CLT-levyä välipohjalaattana.



Värähtelymitoituksessa tarkastellaan välipohjarakenteen ominaistaajuutta sekä pistekuorman aiheuttamaa hetkellistä taipumaa. Tarkasteltavan levyn tehollinen taivutusjäykkyys tulee määrittää sekä jännevälistuuntaan, että poikittaissuuntaan.

Jännevälistuuntaisen taivutusjäykkyyden laskennassa teholliseen poikkileikkaukseen kuuluu jännevälistuuntaiset lamellikerrokset, jotka ovat kuvassa 1 numeroituna 1, 2 ja 3. Symmetrisen viisikerroksisen CLT-levyn mitoituksessa voidaan käyttää joustavasti kootun kerrospalkin teoriaa RIL 205-1-2017 mukaan.

$E_{0,mean} = 11500 \text{ N/mm}^2$  lamellin kimmomoduuli

$G_{R,mean} = 65 \text{ N/mm}^2$  tasoleikkauksen liukumoduuli

$L = 4400 \text{ mm}$  jänneväli

$t = 20 \text{ mm}$  poikittaissuuntaisen lamellin paksuus

$b = 1000 \text{ mm}$  tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys

$h = 130 \text{ mm}$  CLT-levyn kokonaispaksuus

$h_1 = 30 \text{ mm}$  lamellin 1 ja 3 paksuus

$h_2 = 30 \text{ mm}$  lamellin 2 paksuus

$a_1 = 50 \text{ mm}$  uloimman lamellin painopisteen etäisyys poikkileikkauksen painopisteeseen

Yksittäisten lamellien tehollinen pinta-ala:

$$A_1 = b \cdot h_1 = 1000 \cdot 30 = 30000 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = b \cdot h_2 = 1000 \cdot 30 = 30000 \text{ mm}^2$$

Symmetrisessä viisikerroksisessa levyssä, lamellikerrosten sekä liuku- ja kimmomoduulien ollessa symmetrisesti samat, liitosten hyötysuhdekerroin on sama uloimmille lamellikerroksille. Liitosten hyötysuhde kertoimet:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left( \frac{\pi^2 \cdot E_{0,mean} \cdot A_1}{L^2} \cdot \frac{t}{G_{R,mean} \cdot b} \right)} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\pi^2 \cdot 11500 \cdot 30000}{4400^2} \cdot \frac{20}{65 \cdot 1000} \right)} = 0,9487$$

$$\gamma_2 = 1$$

$$\gamma_3 = \gamma_1$$

Symmetrisen viisikerroksisen CLT-levyn tehollinen jäyhyysmomentti voidaan laskea kaavalla:

$$I_{ef,L} = \sum_1^3 (I_i + \gamma_i \cdot A_i \cdot a_i^2) \quad [\text{mm}^4] \quad (4.3.1.1)$$

Ja yksittäisten lamellien tehollinen jäyhyysmomentti:

$$I_{y,1} = \frac{b \cdot h_1^3}{12} + \gamma_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 = \frac{1000 \cdot 30^3}{12} + 0,9487 \cdot 30000 \cdot 50^2 = 73399627,4 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,2} = \frac{b \cdot h_2^3}{12} = \frac{1000 \cdot 30^3}{12} = 2250000 \text{ mm}^4$$

$$I_{y,3} = I_{y,1}$$

Kun  $I_{y,1} = I_{y,3}$  saadaan tehollinen jäyhyysmomentti:

$$I_{ef,L} = 2 \cdot I_{y,1} + I_{y,2} = 2 \cdot 73399627,4 + 2250000 = 1,49 \cdot 10^8 \text{ mm}^4$$

Tehollinen taivutusjäykkyys jänneväliin suunnassa:

$$(EI_{ef})_L = E_{0,mean} \cdot I_{ef,L} = 11500 \cdot 1,49 \cdot 10^8 = 1,714 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Värähtelymitoituksessa tarkastellessa rakenteen ominaistajuuden lisäksi pistekuorman aiheuttamaa hetkellistä taipumaa, jolloin huomioidaan myös levyn poikittaissuuntainen tehollinen poikkileikkaus ja lasketaan poikkisuuntainen tehollinen taivutusjäykkyys. Poikittaissuuntaisen tehollisen poikkileikkauksen laskennassa lamellikerrokset 1 ja 3 eivät vaikuta taivutusjäykkyyteen, joten poikittainen tehollinen poikkileikkaus koostuu

ainoastaan poikittaissuuntaisista lamellikerroksista. Keskeisen lamellikerroksen liukuma tulee huomioida tehollisen jäyhyysmomentin laskennassa.

$L = 2500 \text{ mm}$  = poikittaisten lamellien pituus (CLT-levyn leveys)

$t = 15 \text{ mm}$  = liimasauman etäisyys neutraaliakseliin

$b = 1000 \text{ mm}$  = tarkastettavan poikkileikkauksen leveys

$h_1 = 20 \text{ mm}$  = poikittaissuuntaisen lamellin paksuus

$a_1 = (h_1/2) + t = (20/2) + 20 = 17,5 \text{ mm}$

Poikittaissuuntaisen lamellin pinta-ala:

$$A_1 = b \cdot h_1 = 1000 \cdot 20 = 20000 \text{ mm}^2$$

Poikittaissuunnan hyötysuhde kerroin kaavasta:

$$\gamma_1 = \frac{1}{1 + \left( \frac{\pi^2 \cdot E_{0,mean} \cdot A_1}{L^2} \cdot \frac{t}{G_{R,mean} \cdot b} \right)} = \frac{1}{1 + \left( \frac{\pi^2 \cdot 11500 \cdot 20000}{2500^2} \cdot \frac{15}{65 \cdot 1000} \right)} = 0,9227$$

Poikittaissuuntaisen lamellin jäyhyysmomentti:

$$I_{y,1} = \frac{b \cdot h_1^3}{12} + \gamma_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 = \frac{1000 \cdot 20^3}{12} + 0,9227 \cdot 20000 \cdot 17,5^2 = 6317996,4 \text{ mm}^4$$

Poikkileikkauksen tehollinen jäyhyysmomentti:

$$I_{ef,B} = 2 \cdot I_{y,1} = 2 \cdot 6317996,4 = 12635992,8 \text{ mm}^4$$

Tehollinen taivutusjäykkyys poikittaissuunnassa:

$$(EI_{ef})_B = E_{0,mean} \cdot I_{ef,B} = 11500 \cdot 12635992,8 = 1,4531 \cdot 10^{11} \text{ Nmm}^2$$

Yhteen suuntaan kantavan välipohjan ominaistaajuus:

$$m_{CLT} = 5 \text{ kN/m}^3 \quad \text{CLT-levyn rakennelaskelmissa käytettävä tilavuuspaino}$$

$$h = 130 \text{ mm} \quad \text{CLT-levyn paksuus}$$

Levyn paino neliötä kohden:

$$m = m_{CLT} \cdot h = 500 \cdot 0,13 = 65 \text{ kg/m}^2$$

Kantava yhteen suuntaan:

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI_{ef})_L}{m}} = \frac{\pi}{2 \cdot (4,4m)^2} \cdot \sqrt{\frac{1,714 \cdot 10^6 Nm^2}{(65 + 30)kg \cdot m^2}} = 10,9Hz > 9Hz$$

Ominaistaajuuden lisäksi värähtelymitoituksessa tarkastetaan 1 kN pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma.

$F = 1 kN$  tarkasteltava pistekuorma

$L = 4400mm$  levyn jänneväli

$B = 2500 mm$  levyn leveys

$$k_s = \min \begin{cases} \sqrt[4]{\frac{(EI_{ef})_B}{(EI_{ef})_L}} \\ \frac{B}{L} \end{cases} = \begin{cases} 0,5396 \\ 0,5682 \end{cases}$$

Kahteen suuntaan kantava välipohjalevyllä ei tarvitse rajoittaa kerrointa  $k_\delta \leq B/L$ .

Pistekuorman aiheuttama hetkellinen taipuma:

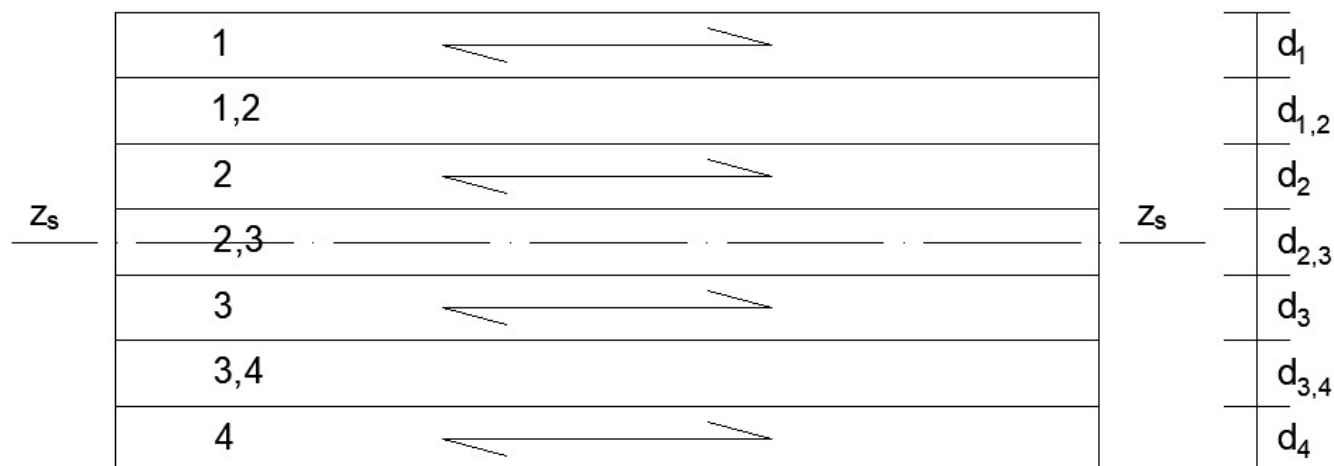
$$\delta = \min \begin{cases} \frac{F \cdot L^2}{42 \cdot k_s \cdot (EI_{ef})_L} \\ \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot b \cdot (EI_{ef})_L} \end{cases} = \begin{cases} \frac{1 \cdot 4,4^2}{42 \cdot 0,5396 \cdot 1714} \\ \frac{1 \cdot 4,4^3}{48 \cdot 1 \cdot 1714} \end{cases} = \begin{cases} 0,4984mm \\ 1,04mm \end{cases}$$

$$\delta = 0,4984mm < 0,5mm$$

Hetkellinen taipuma täyttää vaatimuksen  $\delta \leq 0,5 mm$ .

## 7-lamellikerroksisen CLT-levyn tehollisen poikkileikkauksen laskentaesimerkki.

Tarkastellaan symmetristä 7-kerroksista CLT-levyä. Teholliseen poikkileikkaukseen kuuluvat levyn pituussuuntaiset lamellit jotka ovat kuvassa 1. numeroituna (1), (2), (3), ja (4). Poikittaissuuntaiset lamellikerrokset on numeroitu (1,2), (2,3) ja (3,4).



Crosslam Kuhmon CLT-L7-220-40

Tarkastellaan välipohjarakenteen yksiaukkoista CLT-välipohjalaattaa, jännevälillä 4,4 m.

$$L := 4400 \text{ mm} \quad h := 220 \text{ mm}$$

Tarkastellaan CLT-levyn 1000mm leveää kaistaa.

$$b := 1000 \text{ mm}$$

Levyn pituussuuntaiset lamellit:

$$d_1 := 40 \text{ mm} \quad d_2 := 40 \text{ mm} \quad d_3 := 40 \text{ mm} \quad d_4 := 40 \text{ mm}$$

Levyn poikittaissuuntaiset lamellit:

$$d_{1,2} := 20 \text{ mm} \quad d_{2,3} := 20 \text{ mm} \quad d_{3,4} := 20 \text{ mm}$$

Tehollisten lamellikerrosten pinta-ala, tarkasteltavan poikkileikkauksen leveydellä  $b=1000\text{mm}$ :

$$A_1 := b \cdot d_1 = 40000 \text{ mm}^2$$

$$A_2 := b \cdot d_2 = 40000 \text{ mm}^2$$

$$A_3 := b \cdot d_3 = 40000 \text{ mm}^2$$

$$A_4 := b \cdot d_4 = 40000 \text{ mm}^2$$

Tehollisten lamellikerrosten painopisteen etäisyys poikkileikkauksen yläreunaan:

$$y_1 := \frac{d_1}{2} = 20 \text{ mm}$$

$$y_2 := d_1 + d_{1,2} + \frac{d_2}{2} = 80 \text{ mm}$$

$$y_3 := d_1 + d_{1,2} + d_2 + d_{2,3} + \frac{d_3}{2} = 140 \text{ mm}$$

$$y_4 := d_1 + d_{1,2} + d_2 + d_{2,3} + d_3 + d_{3,4} + \frac{d_4}{2} = 200 \text{ mm}$$

CLT-levyn poikkileikkauksen kokonaispainopisteen etäisyys levyn yläreunaan:

$$z_s := \frac{A_1 \cdot y_1 + A_2 \cdot y_2 + A_3 \cdot y_3 + A_4 \cdot y_4}{A_1 + A_2 + A_3 + A_4} = 110 \text{ mm}$$

Symmetrisessä poikkileikkauksessa kokonaispainopisteen yläreunaan on yhtä kuin puolet poikkileikkauksen kokonaiskorkeudesta.

Tehollisten lamellikerrosten painopisteen etäisyys kokonaispainopisteeseen:

$$a_1 := y_1 - z_s = -90 \text{ mm}$$

$$a_2 := y_2 - z_s = -30 \text{ mm}$$

$$a_3 := y_3 - z_s = 30 \text{ mm}$$

$$a_4 := y_4 - z_s = 90 \text{ mm}$$

7-kerroksiselle CLT-levylle tulee käyttää laajennettua teoriaa, tehollisen hyötysuhdekertoimen laskentaan. Lasekennassa teholliset hyötysuhdekertoimet ratkotaan käyttäen matriisiyhtälöä.

Symmetrisessä poikkileikkauksessa voidaan olettaa lamellien liimasauman olevan samanlainen jokaiselle saumalle joten poikittaislamellien liukumoduuli voidaan olettaa olevan sama koko poikkileikkaukselle. Pituussuuntaisten lamellikerrosten ollessa identtiset symmetrisessä poikkileikkauksessa, voidaan lamellien kimmomoduuli olettaa olevan sama kaikille lamellikerroksille.

$$E_{0.mean} := 11500 \frac{N}{mm^2} \quad G_{R.mean} := 65 \frac{N}{mm^2}$$

$$C_{1.2} := \frac{b \cdot G_{R.mean}}{d_{1.2}} = (3.25 \cdot 10^3) \frac{N}{mm^2}$$

$$C_{2.3} := \frac{b \cdot G_{R.mean}}{d_{2.3}} = (3.25 \cdot 10^3) \frac{N}{mm^2}$$

$$C_{3.4} := \frac{b \cdot G_{R.mean}}{d_{3.4}} = (3.25 \cdot 10^3) \frac{N}{mm^2}$$

Kun kyseessä on yksiaukkoinen, yhteensuuntaan kantava välipohjalaatta, on laatan oletettu viitepituus yhtä kuin koko jännevälin kokonaispituus.

$$l_{ref} := L = 4400 \text{ mm}$$

#### Assumption of the reference lengths:

Single-span girders:  $\ell_{ref} = \ell$

Continuous girders:  $\ell_{ref} = \frac{4}{5} \ell_{min} = 0,8 \cdot \ell_{min}$

Cantilevers:  $\ell_{ref} = 2 \cdot \ell$

Buckling members:  $\ell_{ref} = \ell_{ki}$

$$D_1 := \frac{\pi^2 \cdot E_{0.mean} \cdot b \cdot d_1}{l_{ref}^2} = 234.505 \frac{N}{mm^2}$$

$$D_2 := \frac{\pi^2 \cdot E_{0.mean} \cdot b \cdot d_2}{l_{ref}^2} = 234.505 \frac{N}{mm^2}$$

$$D_3 := \frac{\pi^2 \cdot E_{0.mean} \cdot b \cdot d_3}{l_{ref}^2} = 234.505 \frac{N}{mm^2}$$

$$D_4 := \frac{\pi^2 \cdot E_{0.mean} \cdot b \cdot d_4}{l_{ref}^2} = 234.505 \frac{N}{mm^2}$$

Symmetrisessä poikkileikkauksessa, lamellikerrosten ollessa saman paksuiset sekä kimmo- ja liukumoduulien ollessa samat jokaiselle lamellikerrokselle saadaan  $C_{jk}$  ja  $D_i$  arvot samaksi jokaiselle lamellikerrokselle. Tämä helpottaa hyötysuhdekertoimen laskussa, kun voidaan haluttaessa lyhentää vi.i arvojen yhtälöitä. Tässä esimerkissä yhtälöitä ei lyhennetä, laskentaperiaatteen esittelyn vuoksi.



[V ja s matriisin arvot saadaan periaatteella:

$$v_{i,i-1} = -C_{i-1,i} \cdot a_{i-1}$$

$$v_{i,i} = (C_{i-1,i} + C_{i,i+1} + D_i) \cdot a_i$$

$$v_{i,i+1} = -C_{i,i+1} \cdot a_{i+1}$$

$$s_i = C_{i,i+1} \cdot (a_{i+1} - a_i) + C_{i-1,i} \cdot (a_i - a_{i-1})$$

$$v_{1,1} := (C_{1,2} + D_1) \cdot a_1 \quad v_{1,2} := -C_{1,2} \cdot a_2 \quad v_{1,3} := 0 \quad v_{1,4} := 0$$

$$v_{2,1} := -C_{1,2} \cdot a_1 \quad v_{2,2} := (C_{1,2} + C_{2,3} + D_2) \cdot a_2 \quad v_{2,3} := -C_{2,3} \cdot a_3 \quad v_{2,4} := 0$$

$$v_{3,1} := 0 \quad v_{3,2} := -C_{2,3} \cdot a_2 \quad v_{3,3} := (C_{2,3} + C_{3,4} + D_3) \cdot a_3 \quad v_{3,4} := -C_{3,4} \cdot a_4$$

$$v_{4,1} := 0 \quad v_{4,2} := 0 \quad v_{4,3} := -C_{3,4} \cdot a_3 \quad v_{4,4} := (C_{3,4} + D_4) \cdot a_4$$

$$V := \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & v_{1,3} & v_{1,4} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} & v_{2,4} \\ v_{3,1} & v_{3,2} & v_{3,3} & v_{3,4} \\ v_{4,1} & v_{4,2} & v_{4,3} & v_{4,4} \end{bmatrix} \quad V := \begin{bmatrix} (C_{1,2} + D_1) \cdot a_1 & -C_{1,2} \cdot a_2 & 0 & 0 \\ -C_{1,2} \cdot a_1 & (C_{1,2} + C_{2,3} + D_2) \cdot a_2 & -C_{2,3} \cdot a_3 & 0 \\ 0 & -C_{2,3} \cdot a_2 & (C_{2,3} + C_{3,4} + D_3) \cdot a_3 & -C_{3,4} \cdot a_4 \\ 0 & 0 & -C_{3,4} \cdot a_3 & (C_{3,4} + D_4) \cdot a_4 \end{bmatrix}$$

$$s_1 := -C_{1,2} \cdot (a_2 - a_1)$$

$$s_2 := -C_{2,3} \cdot (a_3 - a_2) + C_{1,2} \cdot (a_2 - a_1)$$

$$s_3 := -C_{3,4} \cdot (a_4 - a_3) + C_{2,3} \cdot (a_3 - a_2)$$

$$s_4 := C_{3,4} \cdot (a_4 - a_3)$$

$$s := \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} \quad s := \begin{bmatrix} -C_{1,2} \cdot (a_2 - a_1) \\ -C_{2,3} \cdot (a_3 - a_2) + C_{1,2} \cdot (a_2 - a_1) \\ -C_{3,4} \cdot (a_4 - a_3) + C_{2,3} \cdot (a_3 - a_2) \\ C_{3,4} \cdot (a_4 - a_3) \end{bmatrix}$$

Teholliset hyötysuhdekertoimet saadaan siten yhtälöstä:

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \end{bmatrix} := V^{-1} \cdot s = \begin{bmatrix} 0.893 \\ 0.872 \\ 0.872 \\ 0.893 \end{bmatrix}$$

Symmetrisen poikkileikkauksen hyötysuhdekertoimet ovat samat lamelleille jotka ovat painopisteestä samalla etäisyydellä.

Pituusuuntaisten lamellien jäyhyysmomentit:

$$I_1 := \frac{b \cdot d_1^3}{12} = (5.333 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

$$I_2 := \frac{b \cdot d_2^3}{12} = (5.333 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

$$I_3 := \frac{b \cdot d_3^3}{12} = (5.333 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

$$I_4 := \frac{b \cdot d_4^3}{12} = (5.333 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

Pituusuuntaisten lamellien teholliset jäyhyysmomentit:

$$I_{ef.1} := I_1 + \gamma_1 \cdot A_1 \cdot a_1^2 = (2.946 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

$$I_{ef.2} := I_2 + \gamma_2 \cdot A_2 \cdot a_2^2 = (3.672 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

$$I_{ef.3} := I_3 + \gamma_3 \cdot A_3 \cdot a_3^2 = (3.672 \cdot 10^7) \text{ mm}^4$$

$$I_{ef.4} := I_4 + \gamma_4 \cdot A_4 \cdot a_4^2 = (2.946 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Poikkileikkauksen tehollinen poikkileikkaus saadaan silloin summana tehollisten lamellikerrosten jäyhyysmomenteista.

$$I_{ef.L} := I_{ef.1} + I_{ef.2} + I_{ef.3} + I_{ef.4} = (6.627 \cdot 10^8) \text{ mm}^4$$

Pituussuuntaisen tehollisen poikkileikkauksen taivutusjäykkyys.

$$EI_{ef.L} := E_{0.mean} \cdot I_{ef.L} = (7.621 \cdot 10^{12}) \text{ N} \cdot \text{mm}^2$$